535.2
D35c

Scientia

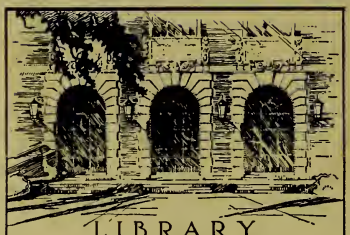
G&N

L. Décombe

La Célérité des ébranlements de l'éther

N°9

Georges CARRÉ & C. NAUD, Éditeurs



LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF ILLINOIS

535.2
D35c

REMOTE STORAGE

SCIENTIA

Exposé et Développement des Questions scientifiques à l'ordre du jour.

RECUEIL PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION
DE

MM. APPELL, CORNU, D'ARSONVAL, Membres de l'Institut;
HALLER, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris;
LIPPMANN, MOISSAN, POINCARÉ, POTIER, Membres de l'Institut,

POUR LA PARTIE PHYSICO-MATHÉMATIQUE

ET SOUS LA DIRECTION
DE

MM. D'ARSONVAL, FILHOL, FOUQUÉ, GAUDRY, GUIGNARD,
Membres de l'Institut; HENNEGUY, Professeur au Collège de France;
MAREY, MILNE-EDWARDS, Membres de l'Institut,

POUR LA PARTIE BIOLOGIQUE

Chaque fascicule comprend de 80 à 100 pages in-8 écu, avec cartonnage spécial.

Prix du fascicule : 2 francs.

On peut souscrire à une série de 6 fascicules (*Série physico-mathématique* ou *Série biologique*) au prix de **10 francs.**

A côté des revues périodiques spéciales enregistrant au jour le jour le progrès de la Science, il nous a semblé qu'il y avait place pour une nouvelle forme de publication, destinée à mettre en évidence, par un exposé philosophique et documenté des découvertes récentes, les idées générales directrices et les variations de l'évolution scientifique.

A l'heure actuelle, il n'est plus possible au

savant de se spécialiser ; il lui faut connaître l'extension graduellement croissante des domaines voisins : mathématiciens et physiciens, chimistes et biologistes ont des intérêts de plus en plus liés.

C'est pour répondre à cette nécessité que, dans une série de monographies, nous nous proposons de mettre au point les questions particulières, nous efforçant de montrer le rôle actuel et futur de telle ou telle acquisition, l'équilibre qu'elle détruit ou établit, la déviation qu'elle imprime, les horizons qu'elle ouvre, la somme de progrès qu'elle représente.

Mais il importe de traiter les questions, non d'une façon dogmatique, presque toujours faussée par une classification arbitraire, mais dans la forme vivante de la raison qui débat pas à pas le problème, en détache les inconnues et l'inventorie avant et après sa solution, dans l'enchaînement de ses aspects et de ses conséquences. Aussi, indiquant toujours les voies multiples que suggère un fait, scrutant les possibilités logiques qui en dérivent, nous efforcerons-nous de nous tenir dans le cadre de la méthode expérimentale et de la méthode critique.

Nous ferons, du reste, bien saisir l'esprit et la portée de cette nouvelle collection, en insistant sur ce point, que la nécessité d'une publication y sera toujours subordonnée à l'opportunité du sujet.

SÉRIE PHYSICO-MATHÉMATIQUE

Appell (P.). *Les mouvements de roulement en dynamique.*

Cotton (A.). *Le phénomène de Zeeman.*

Décombes (L.). *La compressibilité des gaz.*

Décombes. *La célérité des ébranlements de l'éther.*

Freundler (P.). *La stéréochimie.*

Hadamard (J.). *La série de Taylor et son prolongement analytique.*

Job (A.). *Les terres rares.*

Laisant (C.-A). *L'interpolation.*

Lippmann (G.). *Détermination de l'Ohm.*

Macé de Lépinay. *Interférences et applications à la métrologie.*

Maurain (Ch.). *Le magnétisme du fer.*

Poincaré (H.). *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes.*

Raoult. *Vaporisation des dissolutions.*

Raveau. *Les nouveaux gaz.*

Villard. *Les rayons cathodiques.*

Wallerant. *Groupements cristallins.*

SÉRIE BIOLOGIQUE

Arthus (M.). *La coagulation du sang.*

Bard (L.). *La spécificité cellulaire.*

Bertrand (M.). *Mouvements orogéniques et déformations de l'écorce terrestre.*

Bohn. *L'évolution des pigments.*

Bonnier (P.). *L'orientation.*

Bordier (H.). *Les actions moléculaires dans l'organisme.*

Courtade (D.). *L'irritabilité dans la série animale.*

Delage (Yves) et Labbé (A.). *La fécondation chez les animaux.*

Dubois (R.). *Le sommeil.*

Fabre-Domergue. *Le cytotropisme.*

Frenkel (H.). *Les fonctions rénales.*

Gilbert (A.) et Carnot. *Les fonctions hépatiques.*

Griffon. *L'assimilation chlorophyllienne et la structure des plantes.*

Hallion. *Modifications du sang sous l'influence des solutions salines.*

Hallion et Julia. *Action vasculaire des toxines microbiennes.*

Le Dantec (F.). *La Sexualité.*

Martel (A.). *Spéléologie.*

Mazé (P.). *Évolution du carbone et de l'azote.*

Mendelssohn (M.). *Les réflexes.*

Poirault (G.). *La fécondation chez les végétaux.*

Renault (B.). *La houille.*

Roger (H.). *L'infection.*

Thiroloix (J.). *La fonction pancréatique.*

Van Gehuchten (A.). *La cellule nerveuse et la doctrine des neurones.*

Vaschide (N.). *Introduction à la psychologie physiologique.*

Winter (J.). *La matière minérale dans l'organisme.*

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

SCIENTIA
Juillet 1900.

Phys. Mathématique
N° 9.

LA CÉLÉRITÉ

DES

ÉBRANLEMENTS DE L'ÉTHER

PAR

L. DÉCOMBE
Docteur ès sciences.

535.2
D35c
REMOTE STORAGE

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

INTRODUCTION 7

CHAPITRE PREMIER. — **Considérations générales sur l'ether.**

Classification des phénomènes physiques 12
Anciens fluides 13
Origine commune 13
Synthèse des forces physiques 15
Conservation de l'énergie 16
Nature des forces physiques 17
Propagation dans le vide 18
Propagation par transparence 18
Hypothèse de l'éther 19

CHAPITRE II. — **Histoire de l'éther.**

Lumière.

Théorie de l'émission 20
Théorie des ondulations 21
Principe d'Huygens 21
Principe d'Young 21
Travaux de Fresnel 21
Expérience de Foucault 22
Périodes de vibrations 22

Chaleur.

Théorie de l'émission. Calorique 23
Rayons de différentes espèces 23
Spectre calorifique 23
Unité du spectre 24
Radiations chimiques 25
Analogies optiques 26
Nature de la chaleur 26
Limites extrêmes du spectre 27

Électricité.

Polarisation rotatoire magnétique 27

Physics. 20 My '02 Stechert. 36

31198

Nombre ν de Maxwell 28
Théorie électromagnétique de la lumière 29

CHAPITRE III. — **Les oscillations hertziennes.**

Formule de Thomson 31
Champs oscillants 32
Expériences de Feddersen 32
Excitateur 34
Excitateur de Hertz 35
Excitateur de Lodge 35
Excitateur de Blondlot 35
Résonateur 35
Propagation le long d'un fil 37
Transparence électromagnétique 37
Réflexion métallique 37
Réfraction 37
Interférences électromagnétiques 37
Interférences dans l'espace 38
Interférences le long des fils 38
Expériences de Righi 38
Polarisation 39
Double réfraction 39
Télégraphie sans fils 40
Radioconducteur de Branly 40
Conclusions 40

CHAPITRE IV. — **La formule de Newton.**

Hypothèses 41
Centre de vibration 41
Ondes sphériques 41
Transversalité des vibrations 42
Ondes planes 42
Formule de Newton 42
Influence du milieu 45
Théorie de Fresnel 45
Théorie de Neumann et de Mac-Cullagh 46
Réfraction 46
Dispersion 46
Cas des phénomènes électriques 47
Pouvoir inducteur spécifique 47
Perméabilité magnétique 47

CHAPITRE V. — **La vitesse de la lumière.**

Essais de Galilée 49
Les Académiciens de Florence 49
Observations de Rœmer 49
Calculs de Delambre 50
Aberration 50
Méthodes physiques 53
Méthode de la roue dentée 53

Expériences de Fizeau 54
Expériences de M. Cornu 54
Expériences d'Young et Forbes 55
Méthode du miroir tournant 56
Expériences de Foucault 58
Expériences de Fizeau et Bréguet 58
Expériences de Foucault 59
Expériences de Michelson 59
Expériences de Newcomb 59

CHAPITRE VI. — La vitesse de l'électricité.

Premiers essais 61
Principe du miroir tournant 61
Expérience de Wheastone 63
Méthode des longitudes 65
Expériences de Fizeau et Gounelle 66
Expériences de Guillemin et Burnouf 67
Expériences de Siemens 67
Examen critique des méthodes précédentes 68

CHAPITRE VII. — La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique.

Expériences de Blondlot, 1893 70
Expériences de Blondlot, 1891 71
Mesures directes 72
Difficultés 73
Expériences de Duane et Trowbridge 73
Expériences de Saunders 75
Conclusion 76

CHAPITRE VIII. — Le nombre v de Maxwell.

Divers systèmes d'unités 78
Système électrostatique 78
Système électromagnétique 78
Le nombre v 79
Calcul de Kirchhoff 79
Théorie de Maxwell 79
Diverses méthodes 80
Méthode de Miss Margaret Maltby 80
Résultats 80
Conclusion 82

CHAPITRE IX. — La dispersion dans le vide.

Considérations générales 83
Observation des satellites de Jupiter 84
Observation des étoiles variables 85
Observation de MM. Young et Forbes 86
Observation des étoiles orbitales 86
Principe de Doppler-Fizeau 86
Analyse spectrale 88
Remarque de M. Tikhoff 88

Conclusion 89

Chapitre X. — **L'éther de Maxwell.**

Constitution de l'éther 90
Théorie de Maxwell 90
Tourbillons moléculaires 91
Déplacement électrique 92
Courant électrique 92
Courants d'induction 93
Vitesse de propagation 94
Nombre ν de Maxwell 94
Théorie électromagnétique de la lumière 96
Dispersion dans le vide 96
Interférences 96

LA CÉLÉRITÉ

DES

ÉBRANLEMENTS DE L'ÉTHER

INTRODUCTION

La recherche des causes premières a eu le don de passionner les penseurs de tous les temps.

L'activité déployée par l'esprit humain pour découvrir la cause cachée et la nature intime des phénomènes est prodigieuse ; aussi, la satisfaction qu'il éprouve n'est pas médiocre en constatant que ses efforts n'ont pas été vains et qu'à force de temps et de patience, il est enfin parvenu à débrouiller tout ce que les apparences avaient de complexe ou d'obscur.

Ce résultat est dû en grande partie aux merveilleux progrès réalisés, surtout depuis un siècle, par la méthode expérimentale.

Pendant longtemps on s'était contenté de la simple observation des faits et l'on suppléait, ou, du moins, on croyait suppléer à son insuffisance à l'aide de certaines formules plus ou moins ingénieuses ; mais, en réalité, sous prétexte d'expliquer la difficulté on se contentait de la déplacer. A quoi sert, par exemple, de dire que l'électricité est un fluide, si je ne sais rien de ce fluide ? La difficulté a changé de nom, voilà tout.

Aujourd'hui que la méthode expérimentale est entre toutes les mains et qu'il n'est plus possible de se payer de mots, l'activité spéculative de la pensée se retrouve sous une autre forme. On ne parle plus de fluides, mais on fait des hypothèses.

Pressé par le besoin étrange de tout expliquer, sans cesse

inquiet et tourmenté, l'esprit humain n'attend pas que l'expérience — toujours longue et difficile à réaliser — lui ait donné la clef du mystère. Il va plus vite ; il explore le chemin à parcourir, il y pose des jalons et il court avec ardeur au but. Quelquefois il se trompe ; mais qu'importe ! Son activité est infatigable. Il revient en arrière et se lance courageusement dans une autre direction.

Lentement, mais sûrement, l'expérience poursuit son œuvre. C'est elle qui dirige les spéculations de la pensée, rectifie ses erreurs et ouvre à son activité des horizons nouveaux. Plus elle avance, plus le champ à explorer est vaste, mais en même temps qu'il s'élargit son unité apparaît plus admirable.

Les bienfaits de la méthode expérimentale ne sont pas seulement spéculatifs.

Chemin faisant, elle découvre des applications nouvelles qui excitent notre admiration. C'est ainsi que nous devons l'*antisepsie* aux recherches entreprises à propos de la question toute philosophique de la génération spontanée et que les *procédés radiographiques* sont une conséquence de travaux de laboratoires purement théoriques.

Le sujet traité dans cet opuscule peut nous fournir une démonstration frappante de cette double marche de la Science.

Pendant longtemps on a admis que la lumière se propageait instantanément, divers essais tentés pour mettre en évidence une propagation successive ayant échoué.

Cependant voici qu'on découvre deux phénomènes astronomiques [1] qui, non seulement trouvent leur explication dans cette dernière hypothèse, mais encore permettent une évaluation de plus en plus précise de la vitesse de la lumière.

On crée alors des méthodes purement physiques pour la mesure de cette quantité. On multiplie les expériences, on en perfectionne les détails et les résultats finissent par présenter une concordance remarquable d'où il ressort que la vitesse de la lumière est actuellement connue à moins de cinquante kilomètres près !

L'histoire de la propagation de l'électricité présente les mêmes phases successives.

Les premières expériences aussi sont négatives ; l'électricité

---

(1) Le retard des éclipses des satellites de Jupiter et l'aberration.

semble se propager instantanément. Mais le miroir tournant dément cette conclusion et permet d'en mesurer la vitesse. La méthode des longitudes conduit, d'autre part, à une série de nombres tout à fait discordants.

On reconnaît alors que ces divergences sont dues à un phénomène importun, la *diffusion du courant*.

Il faut donc supprimer cette diffusion. Mais cela ne sera possible qu'une fois découvertes les oscillations électriques. Plus de quarante années s'écoulent donc avant que la mesure de la vitesse de l'électricité puisse être reprise dans les conditions précises indiquées par la théorie. Mais cette fois les résultats sont concordants et conduisent à admettre que, dans les conditions de l'expérience, la vitesse de l'électricité est *sensiblement* égale à celle de la lumière.

Une nouvelle question alors se pose.

Cette égalité est-elle absolue ou seulement approchée ?

Si l'égalité des deux vitesses n'est qu'approchée, il faut admettre que la vitesse de propagation est fonction de la longueur d'onde ; et alors la lumière rouge, par exemple, ne doit pas se propager avec la même vitesse que la lumière jaune ou bleue.

Pendant longtemps on a admis, sur la foi d'expériences négatives, que les rayons lumineux de différentes couleurs se propageaient avec la même vitesse dans le vide. Mais un résultat négatif n'est pas nécessairement concluant car il peut être dû au défaut de sensibilité des méthodes.

En étudiant la question de plus près on peut arriver à mettre en lumière certains faits, passés jusqu'à présent à peu près inaperçus, qui semblent confirmer la nouvelle hypothèse. Divers rapprochements conduisent d'autre part à la même conclusion.

Bref, un nouveau champ d'investigations s'offre à l'activité des chercheurs.

Pendant ce temps, la découverte des oscillations électriques démontre irréfutablement l'identité de nature de la Lumière et de l'Electricité et donne lieu à une application nouvelle et du plus haut intérêt.

Un illustre physicien allemand découvre, en effet, un appareil dans lequel l'électricité peut prendre un mouvement oscillatoire si rapide que les oscillations s'y comptent par centaines de millions à la seconde. Cette circonstance permet de réaliser

avec cet agent une série de phénomènes analogues à ceux de l'optique.

Ce qui remplace l'œil, dans ces expériences, c'est un petit instrument d'une extrême simplicité, le *résonateur*, doué, il faut le dire, d'une sensibilité assez médiocre pour les ondes électriques. Celles-ci se propagent dans l'espace comme les ondes lumineuses. L'œil ne les voit pas, mais le résonateur décèle leur présence.

Dix ans ne sont pas écoulés qu'un savant français invente un résonateur nouveau, d'une sensibilité extrême, le *radioconducteur*, susceptible d'entrer en activité sous l'action d'ondes électriques extrêmement faibles.

C'est alors qu'un Russe s'empare des deux appareils et essaie d'augmenter considérablement la distance entre le producteur d'ondes et le récepteur.

La télégraphie sans fils était inventée.

Les expérimentateurs deviennent nombreux ; les expériences se multiplient. On parvient enfin à établir par le procédé nouveau une correspondance régulière à travers la Manche, sur une distance de 54 kilomètres.

Entre temps, d'épouvantables catastrophes (1) mettent à l'ordre du jour l'emploi de la télégraphie sans fils pour éviter les collisions en mer.

Divers systèmes sont proposés. La question est à l'étude. Avant peu, espérons-le, elle sera complètement résolue.

Nous nous proposons dans cet ouvrage, après avoir rappelé les diverses considérations à la suite desquelles on est arrivé à la conception de l'éther, d'étudier plus particulièrement la propagation des ébranlements qui lui sont communiqués par les vibrations matérielles, et de résumer aussi simplement que possible les nombreux travaux, dont quelques-uns sont fort récents, auxquels cette question a donné lieu.

Disons tout de suite que nous n'avons considéré que la propagation des ébranlements dont est susceptible l'éther *libre*, le cas de l'éther engagé dans un milieu pondérable ayant donné lieu à une quantité de travaux si considérable que leur exposé même succinct suffirait à lui seul pour remplir un ouvrage double de celui-ci. Un tel volume d'ailleurs mériterait beau-

(1) Tel, par exemple, le naufrage du transatlantique *La Bourgogne*.

coup plus exactement le titre de : *Dispersion* ; il y faudrait faire figurer en particulier, les nombreuses recherches tant théoriques qu'expérimentales relatives à la *Dispersion anomale*.

CHAPITRE PREMIER

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉTHER

Classification des phénomènes physiques. — Les phénomènes variés qui font l'objet de la physique peuvent se rattacher, dans l'état actuel de la science, à deux groupes fondamentaux qu'il importe de bien distinguer.

Ceux du premier groupe ont pour support, pour *substratum*, la matière elle-même, sous l'une quelconque des formes que nous sommes habitués à lui reconnaître. Tels sont les phénomènes de compressibilité, d'élasticité, d'acoustique, de capillarité, etc....

On admet universellement aujourd'hui que la matière est discontinue, c'est-à-dire formée par l'agrégation de particules insécables, appelées *molécules*, qui jouissent de toutes les propriétés physiques de la substance à laquelle elles appartiennent. Cette hypothèse est entièrement confirmée d'ailleurs par tout ce que nous savons des propriétés de la matière. Si l'on imagine que ces diverses particules soient soumises à des forces intérieures ou extérieures convenables, on arrive à expliquer ou à prévoir la plupart des phénomènes du premier groupe (1).

Ils sont, en effet, régis par les lois de la mécanique rationnelle et satisfont en particulier au principe de la conservation de l'énergie qui s'exprime ainsi :

« *La demi-variation de la force vive d'un système matériel quelconque est égale à la somme des travaux de toutes les forces appliquées au système pendant le même temps.* »

En d'autres termes, il n'y a jamais de force vive perdue ; elle se retrouve toujours quelque part sous forme de travail.

---

(1) C'est ainsi que la considération des forces de cohésion permet d'établir la théorie des phénomènes capillaires.

Réciproquement le travail ne se perd pas ; en disparaissant, il régénère de la force vive.

Le deuxième groupe de phénomènes comprend ceux pour lesquels l'intervention de la matière — au moins sous la forme que nous lui connaissons — ne suffit plus à l'explication complète des faits.

Les phénomènes de chaleur, de lumière, d'électricité et de magnétisme sont dans ce cas.

Anciens fluides. — Aux débuts de la science on avait imaginé des agents spéciaux qui, sous le nom de *fluides*, ont tenu lieu pendant longtemps d'explications rationnelles.

A mesure que la science s'est développée on a été conduit à abandonner les uns après les autres tous ces fluides plus ou moins mystérieux ; le lien qui unit les divers phénomènes s'est dessiné avec une netteté croissante, leur nature intime s'est révélée et on a pu finalement les rattacher à une seule et même cause : *le mouvement*.

Origine commune. — Ce serait une erreur de croire qu'il est besoin de connaissances très étendues et de démonstrations compliquées pour établir la valeur de cette conclusion. Elle se dégage avec une remarquable netteté d'un petit nombre de faits dont quelques-uns sont connus depuis fort longtemps.

Si l'on considère, en effet, les sources les plus communes de chaleur, de lumière et d'électricité [1] on est frappé de voir quelles analogies se rencontrent dans la production de ces phénomènes pourtant si dissemblables en apparence.

C'est un fait connu des premiers hommes que celui par lequel les substances incandescentes émettent à la fois de la lumière et de la chaleur. On sait de toute antiquité qu'en frottant l'un contre l'autre deux morceaux de bois convenables on finit par obtenir une flamme douée de chaleur et de lumière. Le soleil, globe de feu immense, nous échauffe en même temps qu'il nous éclaire.

D'autre part, on sait depuis très longtemps aussi [2] que le frot-

(1) Le magnétisme se rattachant à l'électricité par les lois bien connues de l'Electromagnétisme, il est inutile de le considérer séparément.

(2) Déjà six cents ans avant notre ère, Thalès de Milet signalait les curieuses propriétés de l'ambre frotté.

tement de l'ambre donne à cette substance la curieuse propriété d'attirer les corps légers. On a reconnu par la suite qu'un grand nombre d'autres substances sont capables de reproduire le même phénomène et qu'on peut le réaliser, moyennant certaines précautions, avec une substance quelconque.

Ainsi le frottement peut engendrer de la chaleur, de la lumière et de l'électricité.

Il en est de même de la compression.

Qu'elle s'exerce sur les solides, les liquides ou les gaz, elle est toujours accompagnée d'un dégagement de chaleur et d'électricité.

Les pièces de monnaies frappées au balancier sont brûlantes et la chaleur dégagée par la brusque compression de l'air est suffisante pour enflammer un morceau d'amadou (briquet à air).

Mais en même temps, il y a production d'électricité.

Æpinus a découvert qu'il suffit de presser légèrement deux corps l'un contre l'autre pour qu'ils se chargent d'électricités contraires. Haüy a obtenu des phénomènes électriques en pressant une lame de spath d'Islande entre ses doigts ; la plupart des cristaux naturels jouissent de la même propriété.

D'une manière générale, toutes les actions mécaniques : frottement, choc, pression, clivage, flexion, déformation, vibration, etc... sont accompagnées de chaleur et d'électricité. Toutes les fois que la quantité de chaleur dégagée est suffisante, il y a, en outre, production de lumière, sous forme d'incandescence. C'est ainsi qu'on peut arriver à rougir une barre de fer en la martelant avec énergie.

Il y a plus encore et notre démonstration va se trouver singulièrement affermie par la considération de faits tirés d'une science plus jeune que la physique, mais assez proche parente d'elle pour que dans un grand nombre de cas la limite commune de leurs domaines s'évanouisse.

La chimie nous fournit, en effet, une série de documents de la plus haute valeur relativement à la question dont il s'agit.

Toutes les réactions chimiques sont accompagnées d'un phénomène calorifique. Suivant qu'il y a dégagement ou absorption de chaleur, la réaction est dite *exothermique* ou *endothermique. Quelques réactions sont accompagnées de lumière. D'ailleurs, c'est aux actions chimiques qu'il faut attribuer la plus grande partie de l'électricité dégagée dans les piles.*

Nous trouverons comme un résumé de ces divers cas dans l'action chimique la plus répandue et à coup sûr la plus connue.

On sait, depuis Lavoisier, que la combustion d'un corps n'est autre chose qu'une oxydation, c'est-à-dire une combinaison d'un ou plusieurs de ses éléments avec l'oxygène de l'air. Or, les combustions dégagent beaucoup de chaleur ; de plus, elles sont accompagnées de lumière ; suivant qu'il y a production de flamme ou simplement incandescence, la combustion est dite *vive* ou *lente*.

Quant à l'électricité dégagée dans les combustions, c'est Volta qui, le premier, l'a mise en évidence. Ses expériences ont été reprises par Pouillet et par un grand nombre d'autres expérimentateurs. La quantité d'électricité dégagée est suffisante pour faire dévier les feuilles de l'électromètre condensateur.

Les actions chimiques sont donc une deuxième et nouvelle source de chaleur, de lumière, d'électricité et cela n'a rien qui puisse nous surprendre, car les réactions de la chimie se réduisent, en réalité, à des actions mécaniques intermoléculaires accompagnées de frottements.

Réciproquement, la chaleur, la lumière et l'électricité peuvent déterminer des actions chimiques. Ce sont là des effets bien connus sur lesquels il est inutile d'insister.

Il y a donc entre les agents que nous considérons identité d'origine. Tous trois dérivent du travail mécanique quelle que soit, du reste, la forme sous laquelle il se présente.

Synthèse des forces physiques. — Cette première conclusion conduit tout naturellement à rechercher si cette identité ne se poursuit pas jusque dans leur nature intime, les différences étant alors purement quantitatives.

Cette hypothèse se trouverait évidemment confirmée par le fait que les agents en question peuvent, sous la réserve de certaines conditions favorables, dériver les uns des autres et s'engendrer mutuellement. Or, c'est précisément ce que l'expérience montre d'une façon remarquable.

Nous connaissons, en effet, le moyen de transformer l'électricité en chaleur et en lumière : les fourneaux électriques sont depuis longtemps entrés dans l'usage domestique et la lumière électrique est universellement répandue. Les phénomènes thermo-électriques et actino-électriques montrent d'ailleurs que la

chaleur et la lumière peuvent dans certaines circonstances engendrer l'électricité.

Pour achever le cycle, il faudrait encore faire voir que la chaleur, la lumière et l'électricité, dérivant d'une cause commune : le travail mécanique (frottements, actions chimiques) et susceptibles de s'engendrer mutuellement, sont en outre capables de régénérer, dans une nouvelle phase, le travail mécanique qui leur a donné naissance.

Cette dernière transformation est manifeste pour l'électricité et la chaleur: l'industrie emploie des moteurs thermiques et électriques de toutes puissances. Elle est aussi réalisée par la lumière qui, on le sait, est capable de produire le travail nécessaire à la réalisation de certaines actions chimiques.

Conservation de l'énergie. — Toutes ces transformations satisfont, aussi bien que les phénomènes purement matériels du premier groupe, au principe de la conservation de l'énergie c'est-à-dire qu'il y a équivalence numérique entre le travail mécanique dépensé en frottement, par exemple, et la quantité de chaleur dégagée par ce frottement; quelles que soient les conditions dans lesquelles on se place, il faut nécessairement effectuer un travail de 425 kilogrammètres pour obtenir une quantité de chaleur égale à une calorie. Inversement, dans un moteur thermique, il faut fournir à l'appareil une calorie pour réaliser un travail de 425 kilogrammètres.

C'est là le principe de l'équivalence mécanique de la chaleur ou principe de Mayer.

Un principe semblable se retrouve en électricité ; on montre, en effet, qu'une quantité donnée d'électricité traversant un électrolyte en décompose un poids déterminé, toujours le même, c'est-à-dire effectue un travail constant. Cette loi, due à Faraday, constitue en quelque sorte le principe de l'équivalence mécanique de l'électricité.

Un troisième principe, qu'on pourrait appeler principe de l'équivalence calorifique de l'électricité porte le nom de Loi de Joule et s'énonce ainsi : « Il y a un rapport constant entre la quantité d'électricité qui traverse un circuit, sous une différence de potentiel donnée, et la quantité de chaleur dégagée dans ce circuit pendant le même temps. »

Ces trois principes qui, au fond, ne sont autre chose que trois formes diverses du principe de la conservation de l'énergie

établissent quantitativement la corrélation qui existe entre les trois éléments : travail, chaleur, électricité.

Il suffirait d'une loi semblable dans laquelle figurerait une quantité de lumière pour non seulement relier complètement entre eux les trois ordres de phénomènes que nous considérons, mais encore pour les rattacher quantitativement à un élément de nature bien connue : le travail.

Nature des forces physiques. — A ce point de notre raisonnement la nature mécanique des anciens agents physiques apparaît clairement. La chaleur, la lumière et l'électricité ne sont autre chose que trois formes de l'énergie et cette affirmation est appuyée à la fois : sur l'origine commune de ces phénomènes, sur le fait qu'ils s'équivalent entre eux qualitativement et quantitativement et sur le fait capital qu'ils équivalent toujours à une certaine quantité de travail.

Nous sommes ainsi amenés à penser que la nature intime de ces agents est celle d'une force vive ou, ce qui revient au même, celle d'un mouvement.

Mais, à son tour, quelle est la nature de ce mouvement ?

Pour répondre à cette question considérons ce qui se passe dans un cas déterminé, celui du frottement, par exemple :

Quand on frotte l'un contre l'autre deux corps solides il est évident que, grâce aux aspérités des surfaces les diverses molécules superficielles s'écartent chacune de leur position d'équilibre en développant des réactions élastiques qui tendent à les y ramener, ce qui aura effectivement lieu dès qu'aura cessé l'action perturbatrice.

Grâce aux forces de cohésion qui s'exercent entre les molécules situées tout à fait à la surface et celles qui se trouvent un peu au-dessous, ces dernières subissent aussi des déplacements semblables et, en vertu de l'élasticité mise en jeu, elles tendent également à reprendre leur position première.

Mais les molécules ainsi écartées ne reviendront pas immédiatement à cette position première, une fois disparue la cause qui les en tenait écartées. Elles n'y arriveront qu'après avoir exécuté de part et d'autre de cette position une série d'oscillations d'amplitudes progressivement décroissantes, de même que le pendule écarté de la verticale effectue à droite et à gauche de celle-ci une série d'oscillations de plus en plus petites avant de s'y établir définitivement au repos.

Nous pouvons maintenant répondre à la question posée tout à l'heure. Le mouvement auquel est due la force vive qui exprime la nature véritable des divers agents physique est un mouvement *vibratoire*.

Quelle que soit la source d'où dérive l'agent que l'on considère, une semblable considération s'impose. En particulier, les actions chimiques doivent être considérées, nous l'avons déjà dit, comme de véritables actions mécaniques intermoléculaires à la suite desquelles chaque molécule ou même chaque atome n'atteint sa position d'équilibre qu'après une série d'oscillations plus ou moins rapidement amorties.

Mais notre analyse ne doit pas s'arrêter là.

En effet, la chaleur, la lumière et l'électricité se propagent. C'est un fait d'expérience. Il importe donc de déterminer le mécanisme de cette propagation.

A-t-elle lieu de molécule matérielle à molécule matérielle comme pour le son ?

Oui, dans un certain nombre de cas. C'est ainsi que, dans le mode de propagation connu sous le nom de *conductibilité*, il est avéré que le véhicule de la chaleur soit la matière elle-même qui transmet de molécule matérielle à molécule matérielle le mouvement vibratoire qui constitue la chaleur.

Propagation dans le vide. — Mais la chaleur et la lumière se propagent aussi dans le vide et dans le vide le plus parfait que nous connaissions, celui des espaces célestes. Le soleil et les étoiles nous envoient, en effet, des radiations calorifiques en même temps que des radiations lumineuses. Cette propagation dans le vide a reçu le nom de *rayonnement*.

Assurément, il n'est pas possible d'affirmer que les espaces célestes soient vides, absolument vides au sens intégral du mot, et nous allons précisément conclure à l'inverse, mais il faut se rappeler que le milieu interplanétaire, s'il existe, est tellement subtil qu'on n'a pas encore pu constater son influence perturbatrice sur le mouvement des planètes animées cependant de vitesses considérables.

Propagation par transparence. — La chaleur, la lumière se propagent enfin par transparence.

Certaines substances, comme le verre, laissent passer les rayons lumineux ; d'autres, comme le sel gemme sont traversées par la chaleur sans absorption sensible.

Ce mode de propagation est absolument distinct de la conductibilité avec laquelle il peut, du reste, coexister. Dans ce dernier cas il y a, à la fois, propagation de molécule à molécule et propagation à travers les espaces intermoléculaires.

Hypothèse de l'éther. — Il a donc fallu imaginer une substance capable de transmettre de proche en proche dans le vide et dans les corps transparents les mouvements vibratoires qui constituent la chaleur et la lumière.

De là, l'hypothèse de l'*éther*, milieu infiniment subtil, répandu partout, remplissant les espaces célestes, pénétrant la matière elle-même dans les intervalles moléculaires. Nous verrons au chapitre suivant comment on a été amené à admettre que ce même éther est aussi le milieu qui sert de support aux phénomènes électriques et magnétiques. Ainsi s'est trouvée réalisée ce que l'on a appelé l'unité des forces physiques, synthèse merveilleuse qui ramène tout au mouvement et qu'il était réservé au XIX^e^ siècle d'établir sur des bases indiscutables.

CHAPITRE II

HISTOIRE DE L'ÉTHER

Historiquement parlant, l'introduction de l'éther dans la science manque d'unité.

On n'est pas arrivé du premier coup, en effet, à la conception d'un milieu unique servant de support commun aux phénomènes lumineux, calorifiques et électriques.

Imaginé d'abord à l'occasion des phénomènes lumineux, l'éther a dû être considéré aussi comme le véhicule des actions calorifiques, une fois qu'on eût démontré l'identité qualitative des deux ordres de phénomènes. Et quand la valeur du nombre v de Maxwel eut été solidement établie par des mesures diverses, aucun doute ne put subsister : le même éther luminifère et calorifère propageait aussi à distance les actions électriques et magnétiques.

L'histoire de l'éther se trouve ainsi divisé tout naturellement en trois parties qui correspondent à son introduction successive en lumière, en chaleur et en électricité.

LUMIÈRE

Comme nous l'avons dit, c'est d'abord pour servir d'explications aux phénomènes lumineux que l'éther a été introduit dans la science. Cette introduction, du moins sous la forme nette et précise qu'elle a conservée depuis, remonte au XVII^e^ siècle.

Théorie de l'émission. — Les anciens considéraient généralement la lumière comme une matière particulière lancée par les

corps lumineux[1]; telle a été l'origine de la théorie de l'*émission* dont Newton fut le plus illustre et le plus ardent défenseur.

Théorie des ondulations. — Malebranche, le premier[2], assimila les phénomènes lumineux à ceux du son, posant ainsi la base du système des *ondulations* qui devait définitivement triompher de son rival[3].

Principe de Huygens. — C'est à Huyghens toutefois que revient l'honneur d'avoir formulé nettement, pour la première fois, les hypothèses fondamentales du système ; il considère la lumière comme résultant des vibrations très rapides des molécules matérielles, vibrations qui se propagent dans un milieu extrêmement subtil *l'éther* et viennent finalement exciter les fibres rétiniennes en produisant la sensation de lumière. Posant ensuite le principe remarquable qui porte son nom il explique la réflexion, la réfraction simple et découvre les lois de la double réfraction dans les cristaux uniaxes.

Principe de Young. — Plus tard Young donne l'explication des franges découvertes par Grimaldi et des anneaux colorés de Newton, au moyen du principe des interférences qu'il déduit immédiatement des propriétés du mouvement vibratoire.

Travaux de Fresnel. — Enfin Fresnel en s'appuyant sur les deux principes précédents donne l'explication complète des

---

(1) Empédocle, dont le système nous a été transmis par Aristote, considérait la matière des corps lumineux comme soumise à un écoulement continu.

Démocrite, Epicure, Lucrèce, admettaient une émission de corpuscules de nature particulière.

(2) Il semble qu'Aristote soit bien près de la théorie des ondulations quand il dit : « Que l'on suppose que ce soit la lumière ou l'air qui soit interposé entre l'œil et l'objet visible, en tous cas, *c'est par le mouvement de ce milieu que l'on voit.* » (*Traité de l'Ame*, liv. II, ch. II).

(3) « Preuve de la supposition que j'ay faite : que la lumière subtile ou éthérée est nécessairement composée de petits tourbillons ; et qu'ils sont les causes naturelles de tous changements qui arrivent à la matière ; ce que je confirme par l'explication des effets les plus généraux de la Physique, tels que sont la dureté des corps, leur fluidité, leur pesanteur, leur légèreté, la lumière, réfraction et réflexion de ses rayons. » (*Recherche de la Vérité.*)

franges de diffraction découvertes aussi par Grimaldi. Il trouve ensuite la polarisation de la lumière, affirme la transversalité des vibrations de l'éther et, dans une série de travaux qui ont immortalisé son nom, il établit une théorie générale de la double réfraction uniaxale et biaxale, celle de la polarisation chromatique, circulaire, elliptique et enfin celle de la polarisation rotatoire.

Malgré la souplesse admirable avec laquelle la nouvelle théorie se prêtait à l'explication des faits anciens et nouveaux et bien que, dans plusieurs cas, elle eût devancé l'expérience — faisant prévoir des phénomènes jusqu'alors inconnus — elle n'était pas encore universellement admise, même après les travaux de Fresnel.

Expérience de Foucault. — C'est à Foucault que revient l'honneur d'avoir définitivement tranché la question.

La théorie de l'émission et celle des ondulations conduisent, en effet, à des conclusions contradictoires relativement à la vitesse de propagation de la lumière dans les différents milieux. La première exige que la vitesse de la lumière soit plus grande dans l'eau que dans l'air. La théorie des ondulations conclut à l'inverse. Pour décider entre les deux théories il suffisait d'une expérience comparative. C'est ce qu'a fait Foucault dans un travail sur lequel nous reviendrons plus loin et d'où il résulte nettement que la lumière se propage *moins vite* dans l'eau que dans l'air.

La théorie de l'émission était donc irrémédiablement condamnée.

Périodes de vibrations. — Dans la théorie des ondulations, chaque radiation colorée du spectre correspond à une période de vibration particulière qui va en diminuant régulièrement du rouge au violet. Autrement dit les vibrations de la lumière violette sont plus rapides que celles de la lumière rouge.

Ces vibrations sont reçues par les fibres rétiniennes et transmises au cerveau par le nerf optique en produisant, suivant leur rapidité, l'impression de telle ou telle couleur déterminée(1).

(1) Il y a ici analogie complète avec ce qui se passe pour le son. Les vibrations de l'air agissent sur le tympan et sont transmises au cerveau

Les procédés de l'optique physique permettent de mesurer les périodes de vibration des diverses couleurs.

Ces périodes sont extrêmement petites.

C'est ainsi que, d'après Fraunhofer, l'extrême rouge et l'extrême violet correspondent respectivement à 400 et à 830 trillions de vibrations par seconde.

CHALEUR

Théorie de l'émission. Calorique. — La chaleur était aussi regardée par les anciens comme une substance particulière lancée par les corps chauds.

Ce n'était là, au fond, autre chose que l'hypothèse plus moderne du *calorique*, hypothèse qui constitue pour la chaleur une théorie de l'émission analogue à celle qui avait été proposée pour la lumière.

Mais cette conception n'a pu tenir longtemps en face des faits multiples qui sont venus mettre en évidence l'identité qualitative absolue de ces deux agents.

On connaît depuis longtemps la propriété qu'ont les *miroirs* et les *verres ardents* de concentrer la chaleur du soleil en même temps que sa lumière. On pouvait déjà conclure de là que la chaleur se réfléchit et se réfracte suivant les mêmes lois que la lumière.

Rayons de différentes espèces. — Delaroche, puis Melloni, ont montré, en outre, qu'il y avait lieu de considérer pour la chaleur des rayons de différentes espèces (comme pour la lumière des rayons de différentes couleurs). En effet, la proportion de chaleur transmise par une même substance varie avec la nature de la source employée. C'est donc que les sources considérées émettent des radiations calorifiques différentes.

Spectre calorifique. — D'autre part les rayons de chaleur solaire, comme les rayons lumineux, se dispersent en se réfractant à travers un prisme de verre.

---

par le nerf acoustique en produisant la sensation du son. La hauteur d'un son dépend de la période de la vibration excitatrice, les sons aigus correspondant aux vibrations les plus rapides.

Ils donnent ainsi naissance à un spectre calorifique qui s'étend à la fois dans la région visible du spectre solaire (région lumineuse) et dans la région *infra-rouge* (voy. la figure).

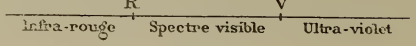


Fig. 1.

Les intensités calorifiques aux différents points du spectre dépendent essentiellement de la substance qui compose le prisme. Ceci nous montre que les différentes substances n'absorbent pas dans la même proportion les diverses radiations calorifiques.

Avec le sel gemme qui est la substance la plus transparente pour la chaleur, ou, comme on dit encore, la plus *diathermane*, la distribution des intensités calorifiques est représentée par la courbe ci-jointe.

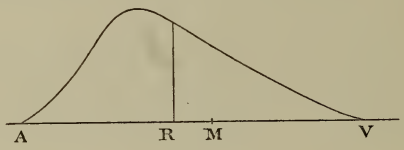


Fig. 2.

On peut conclure de ces expériences que les rayons de chaleur de différentes espèces ne sont pas également réfrangibles, puisque la réfraction a pour effet de les étaler en spectre. Cette propriété a été, du reste, vérifiée directement par Melloni. L'analogie avec la dispersion lumineuse est évidente.

Unité du spectre. — Restait à savoir s'il existait vraiment deux spectres distincts, l'un lumineux, l'autre calorifique, mais partiellement superposés dans la région commune RV ou si, au contraire, il n'y avait lieu de considérer qu'un seul spectre s'étendant de A à V, jouissant dans la région visible RV de propriétés à la fois lumineuses et calorifiques et dans la région infra-rouge AR de propriétés calorifiques seulement. Dans ce dernier cas la distinction entre la chaleur et la lumière serait toute subjective et due seulement à la manière différente dont les diverses radiations affectent nos organes.

Or, c'est ce qui a lieu, ainsi que l'ont démontré Masson et Jamin en faisant voir :

1° Qu'une substance quelconque placée en M, dans la région visible, absorbe la même proportion de chaleur et de lumière ;

2° Que la longueur d'onde de la radiation lumineuse en ce point est égale à celle de la radiation calorifique.

De l'égalité des longueurs d'onde on déduit immédiatement celle des périodes.

Ainsi, en un point donné du spectre visible, il n'y a pas à la fois un rayon lumineux et un rayon calorifique, c'est-à-dire deux vibrations distinctes superposées, mais bien une seule vibration de période déterminée.

Il faut conclure de là que les radiations comprises dans la région visible jouissent de la propriété d'exciter à la fois les organes du toucher (impression de chaleur) et ceux de la vision, tandis que les radiations contenues dans l'infra-rouge jouissent seulement de la première de ces propriétés.

Cette anomalie, si toutefois c'en est une, disparaît si l'on admet que chacun de nos sens n'est affecté que par les vibrations dont les périodes sont contenues entre certaines limites. C'est ce qui a lieu, du reste, pour les vibrations sonores qui, on le sait, ne sont perceptibles à l'oreille qu'à la condition de n'être ni trop lentes ni trop rapides [1]. Rien ne permet, du reste, d'affirmer *a priori* que les échelles de perceptibilité des phénomènes calorifiques et lumineux soient identiques, ni même que l'une soit le prolongement de l'autre.

Si donc ces échelles empiètent l'une sur l'autre les radiations comprises dans la partie commune seront capables d'affecter à la fois les organes correspondants et possèderont par conséquent des propriétés calorifiques et lumineuses.

C'est ce qui a lieu pour la région visible du spectre.

Dans la région infra-rouge les radiations ne sont pas assez rapides pour exciter la rétine ; elles produisent simplement la sensation de chaleur.

Radiations chimiques. — Outre celles que nous venons de considérer, il y a encore dans le spectre des radiations parti-

(1) L'oreille ne perçoit que les sons compris entre 16 et 36.850 vibrations par seconde (Expériences de Despretz).

culières qui n'agissent ni sur la rétine, ni sur le toucher, mais qui possèdent des propriétés chimiques très actives.

Ces radiations occupent dans le spectre la région appelée *ultra-violette* (voy. fig. 1). Les radiations lumineuses, depuis les environs du jaune jusqu'au violet jouissent également de propriétés chimiques.

Il résulte des expériences de M. Becquerel que, dans la région visible du spectre, les rayons chimiques ne sont pas distincts des rayons calorifiques.

Si l'œil ne perçoit pas les rayons ultra-violets c'est que les vibrations qui leur correspondent sont trop rapides pour impressionner la rétine ; à plus forte raison ne peuvent-elles affecter le toucher et produire la sensation de chaleur ; par contre, la dissociation d'une molécule chimique en ses atomes composants exige une rapidité de vibration que ne présentent pas les radiations infra-rouges et que présentent à peine les radiations les moins réfrangibles de la région lumineuse.

Analogies optiques. — Revenons aux radiations calorifiques. On a pu répéter avec ces radiations tous les phénomènes de l'optique physique.

Fizeau et Foucault les ont fait *interférer* par le dispositif des miroirs de Fresnel et ont obtenu des franges alternativement froides et chaudes.

Knaubloch a pu réaliser la *diffraction* de la chaleur et répéter, avec les rayons calorifiques, l'expérience analogue à celle des *anneaux de Newton*.

Ce même physicien a mis en évidence la *double réfraction* de la chaleur.

La *polarisation calorifique* a été découverte par Bérard, la *polarisation rotatoire* du quartz pour la chaleur par Biot et Melloni ; celle de plusieurs liquides par La Provostaye et Desains.

Enfin, il n'est pas jusqu'à la *polarisation rotatoire magnétique* qui n'ait été reproduite en chaleur par Wartmann.

Nature de la chaleur. — L'identité des deux ordres de phénomènes est donc complète et il faut admettre que la chaleur, comme la lumière, est due aux vibrations moléculaires de la matière, vibrations qui se propagent, grâce à l'éther, dans les espaces célestes et dans les interstices moléculaires des corps diathermanes.

Limites extrêmes du spectre. — Les mesures les plus récentes ont donné pour les radiations les moins réfrangibles du spectre calorifique, environ 100 trillions de vibrations par seconde, tandis que les radiations les plus réfrangibles du spectre ultra-violet correspondent à 1600 trillions.

Si l'on assimile le spectre des diverses radiations à la gamme des sons, on voit qu'il renferme quatre octaves qui se répartissent sensiblement comme il suit :

1re et 2e octave	*Spectre calorifique*
3e octave	*Spectre lumineux*
4e octave	*Spectre ultra-violet*

ÉLECTRICITÉ

Polarisation rotatoire magnétique. — C'est en 1845 que Faraday découvrit le fait capital de la rotation du plan de polarisation de la lumière sous l'action d'un champ magnétique puissant. Jusque-là aucun lien ne semblait exister entre les phénomènes lumineux et les phénomènes électriques.

On savait bien que les décharges électriques avaient lieu, le plus souvent, sous forme d'une étincelle lumineuse, mais de là à entrevoir des relations intimes entre les deux ordres de phénomènes, il y avait un abîme.

La découverte de Faraday ouvrit donc une voie nouvelle à la science ; il importe, par conséquent, d'entrer dans quelques détails à son sujet.

Dans la théorie des ondulations on regarde un rayon lumineux comme constitué par les vibrations successives des molécules d'éther placées sur le chemin parcouru par la lumière.

Ces vibrations sont transversales, c'est-à-dire perpendiculaires à la direction du rayon, mais, en général, elles sont orientées dans toutes les directions autour de ce rayon.

S'il arrive que, pour une raison quelconque, elles soient toutes dirigées dans un même plan (fig. 3), on dit que le rayon lumineux est *polarisé*.

Pour des raisons que nous n'avons pas à développer ici le plan perpendiculaire au plan des vibrations porte le nom de plan de polarisation.

Supposons que l'on fasse traverser au rayon lumineux un

milieu transparent et que l'on vienne à développer dans ce milieu un champ magnétique dont les lignes de forces soient parallèles à la direction du rayon.

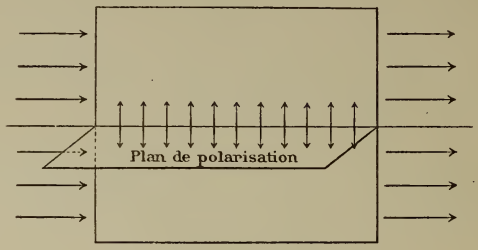


Fig. 3.

On constate, par les procédés de l'optique physique, que le plan de polarisation tourne aussitôt d'un certain angle dont la grandeur est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique.

Si celui-ci n'est pas parallèle au rayon, la rotation du plan de polarisation est proportionnelle, pour une substance donnée, à la composante du champ parallèle au rayon.

Quant au sens de la rotation, elle coïncide, pour les milieux diamagnétiques, avec celui du courant sinusoïdal qui engendrerait un champ de même sens que le champ employé.

Pour les milieux magnétiques, le sens de la rotation est inverse de celui-là.

On conçoit toute l'importance de cette expérience. Elle met nettement en évidence l'existence d'un lien étroit entre le magnétisme et la lumière.

Nombre v de Maxwell. — Les unités électriques et magnétiques sont susceptibles d'être évaluées dans plusieurs systèmes distincts dont deux seulement sont dignes d'intérêt et ont prévalu dans la pratique.

On peut, en effet, choisir à volonté l'unité de quantité d'électricité, par exemple ; mais alors l'unité du magnétisme n'est pas arbitraire et se trouve entièrement définie par les relations de l'Electromagnétisme.

Si l'on adopte cette manière de procéder, on constitue un système particulier d'unités que l'on appelle le *système électrostatique*.

On peut, au contraire, choisir arbitrairement l'unité de magnétisme et considérer l'unité de quantité d'électricité comme dérivant de la première.

On réalise ainsi le *système électromagnétique*.

Supposons qu'on évalue successivement une même quantité d'électricité dans le système électrostatique et dans le système électromagnétique. Soient q et q' les valeurs numériques de cette quantité dans les deux systèmes considérés. Maxwell désigne le quotient $\frac{q}{q'}$ par la lettre v.

La valeur de ce rapport a été déterminée expérimentalement par Weber et Kohlrausch, Maxwell, Sir W. Thomson.

Chose inattendue et merveilleuse, cette valeur numérique a été trouvée égale à celle qui représente la vitesse de la lumière!

Cette détermination a été refaite depuis par diverses méthodes et toujours elle a conduit à des nombres voisins de 300 000 kilomètres.

Ce rapprochement singulier entre un simple rapport numérique, déduit de phénomènes électriques et magnétiques, et la vitesse de propagation d'un phénomène d'un tout autre ordre — au moins en apparence — était d'autant plus étrange qu'on ne connaissait alors aucun phénomène électrique ou magnétique présentant une analogie quelconque avec un phénomène lumineux connu.

Maxwell donna la signification précise de cette coïncidence. Il montra que le rapport v est théoriquement égal à la vitesse avec laquelle l'*onde électromagnétique* se propage dans l'espace [1]. Le résultat précédent s'interprétait donc simplement de la manière suivante : *La vitesse de l'onde électromagnétique est égale à celle de la lumière.*

Qu'était-ce à dire, sinon que les phénomènes électromagnétiques et les phénomènes lumineux avaient le même véhicule, l'éther par conséquent, qui devenait du même coup une sorte de milieu universel servant à propager non seulement la lumière et la chaleur, mais aussi l'électricité et le magnétisme.

Théorie électromagnétique de la lumière. — Partant de là, Maxwell parvint à établir cette proposition admirable que *la*

(1) Nous définirons plus loin l'onde électromagnétique (voir chapitre suivant).

lumière n'est pas autre chose qu'un phénomène électromagnétique, accomplissant ainsi la synthèse totale de toutes les forces physiques.

Malheureusement le travail de Maxwell était entièrement théorique. Il y manquait la consécration de l'expérience.

Celle-ci ne vint qu'avec Hertz un quart de siècle plus tard.

Le chapitre suivant sera consacré à l'œuvre de cet éminent physicien.

CHAPITRE III

LES OSCILLATIONS HERTZIENNES (1)

Le principe sur lequel repose la production de ces oscillations réside tout entier dans un calcul que Sir William Thomson avait depuis longtemps exposé.

Formule de Thomson. — Considérons un condensateur ayant une capacité C et possédant sur ses armatures des charges électriques égales et de signes contraires.

Faisons communiquer entre elles ces armatures au moyen d'un fil conducteur de résistance R et self-induction L. L'électricité va s'écouler le long du fil en déchargeant le condensateur.

Cette décharge peut avoir lieu sous deux formes distinctes : la forme *continue* et la forme *oscillatoire*. Cette dernière a lieu toutes les fois que la capacité C, la résistance R et la self-induction L satisfont à la relation :

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \qquad (2)$$

La période de l'oscillation est alors donnée (si l'on suppose R très petit) par la formule

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Il faut bien comprendre en quoi consistent ces oscillations. Au moment où l'on établit la communication entre les armatures du

(1) Pour plus de détails sur cette question consulter l'ouvrage de M. Poincaré intitulé : *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*. (Collection *Scientia*.)

condensateur, les deux charges qu'elles possèdent se précipitent dans le fil pour s'y recombiner ; mais la résistance de celui-ci étant faible (condition α) elles dépassent leur position d'équilibre, chacune d'elles remontant jusqu'à l'armature opposée qu'elle charge électrostatiquement pendant un temps très court : l'électrisation des armatures est alors inverse de leur électrisation initiale. En vertu du même mécanisme les deux charges se précipitent de nouveau dans le fil, dépassent encore la position d'équilibre et rechargent les armatures, qui retrouvent alors leurs électrisations primitives, du moins quant au signe, une partie des charges s'étant recombinée dans le mouvement.

Les mêmes phénomènes se reproduisent ainsi, avec une intensité progressivement décroissante, jusqu'à ce que toute l'énergie potentielle de la charge primitive soit épuisée.

Champs oscillants. — Il y a donc dans le fil de décharge une série de courants, successivement de sens contraires, qui engendrent dans l'espace environnant un champ magnétique alternatif de même période [1].

De plus, entre deux inversions de courant, les armatures se trouvent posséder pendant un instant des charges électriques qui déterminent autour d'elles un champ électrostatique de très courte durée.

Il en résulte, tout autour de l'appareil, deux champs superposés : l'un électrostatique, l'autre magnétique, tous deux oscillants, mais décalés l'un par rapport à l'autre d'une demi-période.

La superposition de ces deux champs constitue ce que l'on appelle un *champ électromagnétique*.

Expériences de Feddersen. — L'existence des oscillations électriques, ainsi prévue par la théorie, a été expérimentalement

(1) On sait qu'un fil métallique parcouru par un courant agit à distance sur l'aiguille aimantée (expérience d'Œrstedt). Celle-ci tend à se mettre en croix avec le courant. Son pôle austral étant dévié vers la *gauche* du courant, c'est-à-dire vers la gauche d'un observateur imaginaire couché le long du courant et regardant le pôle austral, de telle sorte que le courant lui entre par les pieds et sorte par la tête (règle d'Ampère). On exprime simplement ce fait en disant qu'un courant électrique engendre tout autour de lui un champ magnétique.

confirmée par Feddersen grâce au *miroir tournant* dont le principe, imaginé par Wheatstone pour la mesure de la vitesse de l'électricité, permet de séparer *dans l'espace* deux phénomènes lumineux très voisins l'un de l'autre *dans le temps*.

Imaginons un petit miroir vertical donnant d'un trait lumineux également vertical une image virtuelle ou réelle.

Si l'on vient à animer ce miroir d'un mouvement de rotation autour d'un axe vertical situé dans son plan et passant par son centre, l'image du trait lumineux se déplace, d'après une propriété connue, avec une vitesse angulaire double de celle du miroir. A cause de la persistance des impressions lumineuses, les positions successives de cette image se juxtaposent sur la rétine en donnant l'impression d'une traînée horizontale brillante ayant pour largeur la hauteur du trait lumineux.

Si ce trait n'est lumineux que pendant un temps déterminé, la traînée brillante sera limitée dans le sens horizontal et sa longueur sera d'autant moindre que la durée de la lumière aura été plus courte.

Supposons maintenant que le trait vertical soit alternativement lumineux et obscur ; son image dilatée, au lieu d'être continue, se présentera sous la forme d'une série de bandes successivement brillantes et obscures.

En dilatant ainsi par la rotation rapide d'un miroir concave l'image de l'étincelle explosive d'une bouteille de Leyde, Feddersen a pu mettre en évidence le caractère oscillatoire de la décharge ; les bords de l'image dilatée présentaient des alternatives de lumière et d'obscurité qui correspondaient aux oscillations du courant. Le phénomène pouvait d'ailleurs être fixé sur une feuille de papier sensible.

Il importe de bien pénétrer le mécanisme par lequel le phénomène lumineux se lie dans l'étincelle au phénomène électrique.

On sait depuis longtemps que l'étincelle qui éclate entre deux conducteurs chargés à des potentiels de signes contraires ne présente pas le même aspect à ses deux extrémités.

Ce fait peut s'expliquer par les différences qui existent entre les particules arrachées à chaque électrode lorsqu'on les étudie au microscope.

On a constaté, en effet, que les particules arrachées à l'électrode positive ont des dimensions parfaitement mesurables et peuvent devenir incandescentes, tandis que les particules né-

gatives échappent à toute mesure et *ne deviennent jamais incandescentes* ; elles paraissent entraînées par volatilisation.

Il y aurait donc, à l'extrémité positive, arrachement de particules solides lumineuses, et à l'extrémité négative dégagement de vapeurs métalliques obscures.

Dans la décharge oscillante les électrodes changent de signe chaque fois que le courant se renverse. Chacune des extrémités de l'étincelle est donc alternativement brillante et pâle ; d'où la possibilité de dissocier cette étincelle par la rotation rapide d'un miroir.

Il est à remarquer que les deux séries de taches lumineuses et obscures qui correspondent dans l'image dissociée à chacune des extrémités de l'étincelle doivent être alternées, c'est-à-dire qu'à un point lumineux de l'une doit correspondre dans l'autre un point obscur et vice versa.

Tous ces caractères sont bien ceux des épreuves obtenues et décrites par Feddersen.

De la distance comprise entre deux points lumineux ou obscurs consécutifs on peut déduire la période de l'oscillation, la vitesse de rotation du miroir étant connue ainsi que sa distance à la feuille de papier sensible.

Les oscillations étudiées par Feddersen étaient comprises entre $\frac{1}{30\,000}$ et $\frac{1}{400\,000}$ de seconde.

Excitateur. — Le mérite de Hertz a été de découvrir un appareil capable de produire des oscillations beaucoup plus rapides encore que celles-là.

Son excitateur électrique est essentiellement formé de deux conducteurs symétriques, chargés à des potentiels égaux et de signes contraires, entre lesquels une étincelle éclate toutes les fois que la différence de potentiel dépasse une certaine valeur qui dépend de la *rigidité électrostatique* du milieu interposé. Cet appareil est assimilable à un condensateur dont le circuit de décharge serait constitué par l'étincelle explosive elle-même. Si donc la condition (α) est satisfaite, et c'est ce qui a lieu dans la plupart des cas, l'excitateur doit être considéré comme un appareil producteur d'oscillations électriques créant autour de lui un champ électromagnétique dont la période serait calculable par la formule de Thomson, s'il était possible toutefois d'évaluer la self-induction de l'étincelle explosive.

Les excitateurs généralement employés se rapprochent toujours plus ou moins de l'un des trois types suivants :

L'excitateur rectiligne de Hertz.

L'excitateur sphérique de Lodge.

L'excitateur fermé de Blondlot.

Nous allons brièvement décrire chacun d'eux.

Excitateur de Hertz. — L'appareil de Hertz se compose de deux plaques P et P′ et d'un fil métallique *ff′* présentant une coupure en *e* pour l'étincelle de décharge.

Les deux moitiés de l'appareil communiquent respectivement avec les deux pôles d'une bobine de Rhumkhorff dont le jeu a pour effet de recharger l'appareil aussitôt chaque décharge effectuée.

Hertz employait aussi, au lieu de plaques métalliques, des sphères de bois recouvertes de papier d'étain.

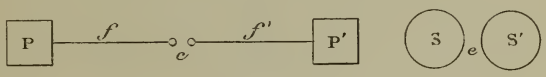


Fig. 4 et 5.

Excitateur de Lodge. — C'est le plus simple de tous. Il se compose de deux sphères métalliques S et S′ en relation avec les deux pôles d'une bobine de Rhumkorff.

L'étincelle éclate en *e*.

Les oscillations de cet appareil s'amortissent très vite. C'est au plus si on en compte trois ou quatre dans chaque décharge.

Excitateur de Blondlot. — L'excitateur de Blondlot est, au contraire, un appareil peu amorti. On en voit la représentation dans la figure 6 ; *c* est un condensateur qui se décharge à travers le fil *ff* et l'étincelle explosive *e*. Le fil $\varphi\varphi$, séparé du fil *ff* par une gaine de caoutchouc sert à recueillir, par induction, des oscillations de même période que celles produites dans *ff*.

Résonateur. — L'exploration du champ électromagnétique créé par l'excitateur se fait au moyen d'un petit appareil appelé résonateur qui consiste en un fil métallique recourbé en forme de cercle ou de rectangle et dont les extrémités se terminent par un micromètre à pointes ou à boules (fig. 7).

Aussitôt qu'un résonateur est placé dans le voisinage d'un excitateur en activité, un flux d'étincelles jaillit entre les boules de son micromètre.

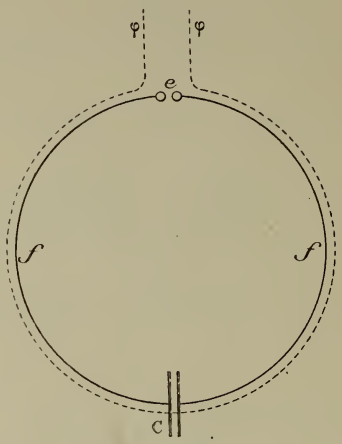


Fig. 6.

Le mouvement dont l'excitateur est le siège se propage donc en rayonnant tout autour de cet appareil ; ce mouvement étant oscillatoire (ainsi que la théorie le prévoit et que les phénomènes d'interférences dont nous parlerons tout à l'heure le montrent nettement), se propage nécessairement dans l'espace sous forme d'ondes successives qui ont reçu le nom *d'ondes électromagnétiques*(1).

Fig. 7.

En général, les étincelles du résonateur sont dues, à la fois, à l'action électrostatique et à l'action magnétique du champ. En orientant convenablement le résonateur par rapport à l'excitateur, on peut éliminer l'une ou l'autre de ces actions et étudier, pour chacune d'elles séparément, la distribution du champ.

(1) C'est par analogie avec la propagation des ébranlements liquides que le mot *onde* a été ici adopté. Le phénomène dont il s'agit est tout à fait analogue à celui par lequel l'agitation produite en un point déterminé de la surface libre d'un liquide se propage tout autour de ce point sous forme d'ondes concentriques.

Propagation le long d'un fil. — Imaginons que l'on dispose convenablement au voisinage d'un excitateur l'une des portions extrêmes d'un long fil conducteur (1). Par induction, il se développe dans ce fil des oscillations qui s'y propagent et dont l'existence est mise hors de doute par le résonateur.

Celui-ci entre, en effet, en activité lorsqu'on vient à l'approcher du fil. Il est, du reste, facile d'éliminer l'action directe de l'excitateur à travers l'espace en orientant convenablement le résonateur. C'est donc bien sous l'action des oscillations induites dans le fil que les étincelles éclatent au micromètre de cet appareil.

La propagation de l'onde électromagnétique se présente donc sous deux formes distinctes : la propagation dans l'espace et la propagation le long d'un fil. Nous reviendrons tout à l'heure sur cette dernière.

Transparence électromagnétique. — On vérifie aisément que le bois, la pierre, le soufre, etc., se laissent traverser par les ondes électromagnétiques. Ces substances interposées entre l'excitateur et le résonateur n'arrêtent pas le jeu de ce dernier.

Réflexion métallique. — Les métaux, au contraire, même en couches minces, arrêtent l'onde électromagnétique et la réfléchissent suivant les lois ordinaires de la réflexion lumineuse. Cette propriété a permis de construire des miroirs paraboliques dont la ligne focale est occupée par l'étincelle d'un excitateur rectiligne. Les ondes émises par ce dernier se transforment en un faisceau de radiations parallèles qui se propagent ensuite par ondes planes.

Réfraction. — On a eu l'idée de construire des prismes avec les substances qui se laissent traverser par l'onde électromagnétique. En faisant tomber sur de tels prismes un faisceau de radiations parallèles on a constaté qu'elles s'y réfractent de la même manière que la lumière dans un prisme transparent.

Interférences électromagnétiques. — Ce n'est pas tout. On a

(1) Par exemple, le fil $_{99}$ de la figure 6. Les deux extrémités de ce fil se prolongent parallèlement entre elles sur une très grande longueur.

pu reproduire avec ces ondes la plupart des phénomènes de l'optique physique, principalement celui des interférences.

Ce phénomène revêt ici deux formes distinctes suivant que l'onde se propage dans l'espace ou le long d'un fil conducteur.

Interférences dans l'espace. — Pour réaliser cette expérience on reçoit normalement l'onde sur une grande feuille de métal jouant le rôle de miroir.

Elle s'y réfléchit normalement, et la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie donne lieu à un système d'ondes stationnaires, caractérisé par des nœuds et des ventres équidistants.

Ces nœuds et ces ventres sont mis en évidence à l'aide du résonateur dont le fonctionnement présente un maximum d'intensité aux ventres et un minimum aux nœuds. Les nœuds de la force magnétique coïncident, comme on pouvait le prévoir, du reste, avec les ventres de la force électrique et *vice versa*.

Dans ces expériences l'internœud est, en général, de l'ordre de grandeur du décamètre.

Interférences le long des fils. — Si l'on promène un résonateur le long d'un fil parcouru par des oscillations électriques, on y constate la présence d'ondes stationnaires.

Il faut donc admettre que l'onde électromagnétique après s'être propagée jusqu'à l'extrémité du fil s'y est réfléchie et, revenant sur elle-même, a donné naissance aux nœuds et aux ventres que l'on observe. La longueur d'onde, dans ce cas, dépend de la nature du milieu dans lequel le fil est plongé. On a pu établir cette loi remarquable que la longueur d'onde dans la propagation le long d'un fil est toujours égale à celle due à la propagation dans un espace constitué par le même milieu que celui qui entoure le fil.

Il résulte de là cette importante proposition qui peut du reste être obtenue par voie théorique : *La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique* a la même valeur dans un milieu donné et le long d'un fil conducteur plongé dans ce milieu.

Expériences de Righi. — Les phénomènes d'interférences électromagnétiques ont pu être répétés, du reste, d'une manière entièrement conforme à l'expérience des miroirs de Fresnel, à celle du biprisme et à celle des anneaux de Newton. Cette

imitation a été obtenue par Righi au moyen d'un excitateur dérivé de celui de Lodge et donnant des oscillations de très courte longueur d'onde (de l'ordre du centimètre.) Cette condition est nécessaire afin de réaliser autant que possible les circonstances dans lesquelles ont lieu les phénomènes optiques correspondants (1).

Le résonateur employé par Righi diffère notablement des résonateurs ordinaires. Sa sensibilité est très grande.

Il se compose d'une lame de verre sur laquelle on a préalablement déposé par voie électrolytique une mince couche d'argent; sur cette couche on trace au diamant un trait qui produit dans le métal une solution de continuité de quelques millièmes de millimètre de largeur.

C'est à travers cette solution de continuité qu'éclatent les étincelles.

Polarisation. — D'après leur mode même de formation les radiations électromagnétiques sont toujours polarisées, car la vibration est nécessairement parallèle à l'axe de l'étincelle excitatrice.

L'emploi d'un réseau formé de fils métalliques parallèles a permis à Hertz de constater cette polarisation.

Si l'on dispose cet appareil entre l'excitateur et le résonateur, de telle sorte que la direction commune des fils soit parallèle à l'axe de vibration, le jeu du résonateur se trouve immédiatement interrompu. Dans la position perpendiculaire à celle-là, au contraire, il n'est aucunement altéré. Dans les positions intermédiaires il croît ou décroît suivant qu'on approche de l'une ou l'autre des deux positions qui précèdent.

Les phénomènes de polarisation par réflexion et par réfraction ont été également reproduits.

On a pu constater la polarisation circulaire ou elliptique due à la réflexion métallique et démontrer que le plan de polarisation est perpendiculaire au plan de vibration.

Double réfraction. — La double réfraction des cristaux pour les ondes électromagnétiques a été mise en évidence par M. Bose à l'aide d'un excitateur sphérique de très petite lon-

(1) Cf. Poincaré, *loc. cit.*

gueur d'onde (6 millim.) et d'un récepteur extrêmement sensible fondé sur le principe du radioconducteur de Branly que nous décrivons plus loin. Le *dichroïsme* a été aussi réalisé par ce physicien.

Télégraphie sans fil. — Il nous reste à parler, pour compléter les analogies que nous signalons, d'une nouvelle et intéressante application des oscillations électriques.

Il s'agit de la télégraphie sans fil.

Dans la télégraphie optique les ondes lumineuses en se propageant transmettent à l'observateur divers signaux conventionnels.

S'il était possible d'envoyer à de grandes distances des ondes électromagnétiques assez puissantes pour impressionner des récepteurs sensibles, on pourrait réaliser un mode de transmission entièrement analogue à celui qui constitue la télégraphie optique. Or, ces diverses conditions ont été réalisées. Tout le mérite en revient à Hertz, d'abord, à qui nous sommes redevables de l'appareil producteur d'ondes et ensuite à M. Branly qui a su trouver un récepteur assez sensible pour être impressionné à des distances qui dépassent actuellement 50 kilomètres.

Radioconducteur de Branly. — L'expérience a montré que les limailles métalliques, en général peu conductrices, le deviennent davantage lorsqu'elles sont placées dans un champ électromagnétique.

Imaginons donc un circuit comprenant un fil métallique, un tube à limailles, une pile et une sonnerie électrique. Au moment où une onde électromagnétique vient frapper la limaille contenue dans le tube, la limaille devient conductrice, le courant se forme et la sonnerie entre en fonctionnement.

Tel est le principe de la télégraphie sans fil dont nous n'avons parlé que pour montrer jusque dans les applications les plus répandues l'analogie remarquable de l'onde lumineuse et de l'onde électromagnétique.

Conclusions. — Ainsi se trouvent expérimentalement vérifiées les hypothèses de Maxwell. La lumière n'est pas autre chose qu'un phénomène électromagnétique et le milieu qui la transmet est le même que celui qui sert à propager les oscillations hertziennes.

CHAPITRE IV

LA FORMULE DE NEWTON

Hypothèses. — Le rôle universel de l'éther étant ainsi démontré, nous nous proposons d'étudier les conditions dans lesquelles s'y propage un mouvement vibratoire donné.

Il sera nécessaire de faire les deux hypothèses suivantes :

1° L'éther est un milieu élastique ;

2° Il est doué d'une propriété analogue sinon identique à la *masse*.

Nous appliquerons ensuite les résultats obtenus aux divers ordres de phénomènes que nous avons à considérer.

Centre de vibrations. — Nous appellerons ainsi un point quelconque de l'espace où nous supposerons réunies un grand nombre de molécules matérielles animées de mouvements vibratoires dirigés en tous sens.

Ondes sphériques. — Soit o un centre de vibrations situé dans un milieu *isotrope*, c'est-à-dire identique à lui-même dans toutes les directions.

Le mouvement vibratoire se transmet aux molécules qui entourent le point o et se propage avec une vitesse constante v dans toutes les directions à partir de ce point.

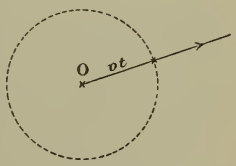


Fig. 8.

Au bout d'un temps quelconque t, et à cause de la symétrie du milieu, le mouvement s'est propagé partout à une distance vt du centre; toutes les molécules d'éther situées sur une sphère de rayon quelconque inférieur ou égal à vt sont dans le même état de vibration, ce qu'on exprime en disant que la propagation a lieu par ondes sphériques.

Transversalité des vibrations. — Les phénomènes de polarisation optique, calorifique et électrique exigent que les vibrations de l'éther soient transversales, c'est-à-dire perpendiculaires à la direction de la propagation.

Dans le cas d'ondes sphériques, cette dernière direction étant celle d'un rayon quelconque, les vibrations des molécules d'éther situées sur une même sphère ont lieu en chaque point dans le plan tangent à la sphère.

Ondes planes. — Soit xy une direction quelconque de l'espace, P un plan indéfini perpendiculaire à cette direction.

Imaginons que toutes les molécules d'éther m, m', m''..., situées dans ce plan soient animées de vibrations dirigées dans le plan lui-même.

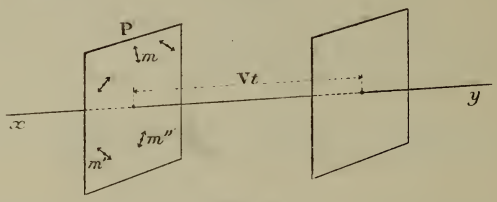


Fig. 9.

La transversalité des vibrations exige que la propagation ait lieu dans la direction xy.

Il est clair qu'au bout d'un temps t quelconque le mouvement se sera propagé par ondes planes successives à une distance Vt du plan P.

Formule de Newton. — Ceci posé, nous nous proposons de déterminer la vitesse de propagation ou, comme on dit plus brièvement, la *célérité* des ondes excitées dans l'éther par un ébranlement quelconque produit en un point déterminé.

Imaginons d'abord que chacune des molécules d'éther m, m', m''... au lieu de vibrer de part et d'autre d'une position d'équilibre, subisse seulement un déplacement infiniment petit dans le plan P.

Ces divers déplacements peuvent d'ailleurs n'être pas parallèles entre eux.

Une réaction élastique se trouve alors développée entre le plan P et le plan infiniment voisin P′, et cette réaction a pour

effet de déplacer infiniment peu dans leur propre plan les molécules de P′.

Ce déplacement détermine à son tour une réaction élastique entre P′ et le plan suivant P″ dont les molécules se déplacent à leur tour, et ainsi de suite, de proche en proche.

Il s'agit de déterminer la vitesse V de cette propagation. Nous supposerons qu'il n'y ait pas d'énergie perdue en frottements.

Soit e la valeur de la force élastique développée entre deux surfaces égales à l'unité et situées en regard l'une de l'autre à une distance infiniment petite.

Nous considérons seulement ce qui se passe à l'intérieur d'un parallélépipède rectangle indéfini dont les arêtes sont parallèles à xy et dont la base σ prise sur le plan P est égale à l'unité.

Tout se passe à l'intérieur de ce parallélépipède comme si les molécules de σ, une fois déplacées dans leur propre plan, subissaient une translation commune de vitesse v parallèlement à xy.

Or, cette translation peut être considérée comme due à la force élastique e qui donnerait successivement au plan σ une série d'impulsions élémentaires lui communiquant chaque fois une quantité de mouvement $v d\mu$, $d\mu$ représentant la masse d'éther répandue sur σ.

Ecrivons que, d'après un théorème connu, l'impulsion élémentaire (produit de la force par le temps élémentaire dt) est égale à l'accroissement de la quantité de mouvement pendant le même temps.

Nous aurons :

$$e\,dt = \mathrm{V}\,d\mu.$$

Intégrant depuis $t = 0$ jusqu'à $t = 1$ seconde, il vient

$$e = \mathrm{V}\,\mu,$$

μ désignant la masse totale d'éther sur laquelle la force élastique e a successivement agi pendant une seconde. Or, au bout d'une seconde, le mouvement s'est propagé à une distance V de la base σ ; μ est donc égal à la masse d'éther contenue dans un parallélépipède rectangle ayant l'unité de surface pour base et V pour hauteur.

On a donc, en désignant par d la densité absolue de l'éther

$$\mu = \mathrm{V}d.$$

Il vient alors :

$$e = \mathrm{V}^2 d,$$

d'où

$$\mathrm{V} = \sqrt{\frac{e}{d}}.$$

Telle est la formule de Newton.

Supposons maintenant que les molécules du plan P, au lieu de subir de simples déplacements, soient animées dans ce plan de mouvements vibratoires quelconques.

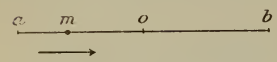


Fig. 10.

Une molécule telle que m (fig. 10) oscille alors de part et d'autre d'une position d'équilibre o.

De a vers o sa vitesse est croissante.

De o vers b elle décroît.

De b vers o elle de nouveau croissante.

De o vers a elle décroît et ainsi de suite.

Or, le chemin total ab peut être décomposé en une série de déplacements élémentaires égaux, parcourus, il est vrai, par des vitesses différentes.

Si donc on admet que l'élasticité développée dans l'éther avec un déplacement élémentaire des molécules est indépendante de la vitesse avec laquelle ce déplacement a lieu, les divers déplacements qui constituent la vibration considérée se propageront les uns à la suite des autres avec une même vitesse V donnée par la formule de Newton. Ce résultat est d'ailleurs indépendant du nombre de déplacements élémentaires qui se succèdent, c'est-à-dire de l'amplitude de la vibration.

Nous pouvons étendre maintenant sans difficultés la formule de Newton au cas de la propagation par ondes sphériques.

L'énergie vibratoire émise par le centre des ondes se répartissant, à mesure qu'elle se propage, sur un nombre de molécules de plus en plus grand (proportionnel au carré de la distance à laquelle l'onde est parvenue), l'amplitude des oscillations de l'éther doit décroître en raison inverse du carré de la distance. Mais nous venons de voir que la vitesse de propagation est

indépendante de l'amplitude des vibrations. La formule de Newton est donc encore applicable.

Remarquons ici que le raisonnement par lequel nous avons établi cette formule est tout à fait indépendant de la manière dont les réactions élastiques se développent dans le milieu considéré. Il nous a suffi d'admettre que ces réactions existent et qu'elles se propagent.

La formule de Newton subsiste donc quelle que soit l'hypothèse que l'on fasse sur l'origine de ces réactions. Nous avons supposé, pour matérialiser la démonstration qu'elles étaient dues aux vibrations des molécules d'éther de part et d'autre d'une position d'équilibre. Mais cela n'était pas nécessaire. Nous aurons l'occasion de nous servir de cette remarque.

La célérité de la lumière et de l'électricité est immense puisqu'elle se chiffre par plusieurs centaines de milliers de kilomètres par seconde. On doit en conclure que l'éther est doué d'une élasticité considérable et d'une faible densité.

Influence du milieu. — Supposons maintenant l'éther engagé dans un milieu déterminé, solide, liquide ou gazeux. La formule de Newton pourra encore être appliquée, à la condition de tenir compte des variations que la présence de la matière peut apporter à l'élasticité et à la densité de l'éther.

Or, nous l'avons vu, l'expérience prouve que la lumière se propage moins vite dans l'eau que dans l'air.

En se reportant à l'expression de la célérité

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}},$$

on voit que l'influence des molécules matérielles est attribuable soit à une diminution de l'élasticité de l'éther, soit à une augmentation de sa densité, soit peut-être aux deux causes réunies.

Théorie de Fresnel. — Fresnel regarde l'élasticité de l'éther comme constante ; sa densité, au contraire, peut varier. Dans ce cas l'affaiblissement de la célérité serait causée par l'augmentation de la densité de l'éther due à la présence des molécules matérielles. On conçoit, en effet, que cette présence puisse donner lieu à un surcroît d'attraction se traduisant par une augmentation de densité.

Théorie de Neumann et de Mac-Cullagh. — Dans cette théorie, c'est la densité de l'éther qui est regardée comme constante, l'élasticité étant variable.

La présence de la matière aurait donc pour effet de diminuer l'élasticité de l'éther.

Réfraction. — Cette diminution de vitesse dans les milieux transparents, une fois bien constatée par l'expérience explique aussitôt la *réfraction*.

On montre, en effet, dans tous les cours d'optique physique, qu'en traversant la surface de séparation de deux milieux où sa vitesse est différente, une onde plane quelconque doit changer de direction, c'est-à-dire subir une certaine déviation dans sa propagation.

Cette déviation est d'autant plus prononcée que la différence des vitesses dans les deux milieux est plus considérable. C'est pourquoi, par exemple, un bâton en partie plongé dans l'eau paraît brisé. D'où le nom de réfraction donné à ce phénomène.

Dispersion. — Lorsque la lumière après s'être propagée dans le vide, c'est-à-dire dans ce que nous avons appelé l'éther libre, pénètre à l'intérieur d'un milieu transparent, non seulement sa vitesse de propagation diminue, mais encore elle devient différente pour les divers rayons colorés qui constituent la lumière blanche ; les rayons violets, par exemple, se propagent moins vite que les rayons rouges ; ceux-ci se réfractent donc moins que ceux-là ; d'où il résulte que, primitivement superposés dans le rayon incident, les divers rayons colorés suivent à l'intérieur du milieu transparent des chemins différents et émergent sous forme d'éventail étalé du rouge au violet en donnant naissance à ce que Newton a appelé le spectre.

Tel est le phénomène de la dispersion qui englobe à la fois, comme nous l'avons vu toutes les radiations chimiques, lumineuses et calorifiques superposées dans la lumière incidente.

D'où vient, dans le milieu transparent l'inégalité de vitesse des diverses radiations ?

Sans nous engager dans une analyse même sommaire des travaux considérables auxquels cette question a donné lieu, nous nous bornerons à remarquer que, si l'on adopte la manière de voir de Neumann et Mac-Cullagh tout se passe comme

si l'élasticité de l'éther engagé dans le milieu transparent était fonction de la rapidité des vibrations incidentes et d'autant plus forte que cette période est plus courte. Or, cette hypothèse n'a rien que de très naturel. On conçoit très bien que la réaction de la matière sur l'éther soit d'autant plus forte que celui-ci s'agite plus vivement.

Cas des phénomènes électriques. — Puisque l'éther est aussi le véhicule des phénomènes électriques et magnétiques, la formule de Newton est applicable à la propagation de l'onde électromagnétique.

Il convient, dans ce cas, de substituer aux coefficients mécaniques c et d des coefficients électriques qui sont : *le pouvoir inducteur spécifique* et la *perméabilité magnétique*.

Pouvoir inducteur spécifique. — Considérons deux charges électriques égales et de signes contraires situées à une certaine distance.

Il se produit dans le milieu qui les sépare une série de réactions élastiques qui ont pour résultat de déterminer entre ces deux charges une attraction proportionnelle, par définition, à l'élasticité du milieu.

Si l'on vient à changer la nature de ce milieu, l'attraction change d'intensité ; c'est un fait d'expérience. C'est donc que l'élasticité de l'éther n'a plus la même valeur.

Le rapport de la nouvelle attraction à la précédente s'appelle le *pouvoir inducteur spécifique du premier milieu par rapport au second ;* si l'on suppose que ce dernier soit le vide (c'est-à-dire l'éther libre), le rapport en question s'appelle simplement : pouvoir inducteur spécifique du premier milieu et se représente habituellement par la lettre k.

Il résulte de là que les pouvoirs inducteurs spécifiques de deux milieux sont en raison inverse de l'élasticité de l'éther engagé dans ces milieux.

Perméabilité magnétique. — La perméabilité magnétique μ d'un milieu donné est proportionnelle, par définition, au flux de force qui traverse ce milieu lorsque celui-ci est soumis à une action inductrice déterminée ; ce flux de force est évidemment proportionnel au nombre de molécules d'éther contenues

dans l'unité de volume du milieu considéré, c'est-à-dire à la densité de l'éther.

Ainsi μ est proportionnel à d ; d'autre part, k est inversement proportionnel à c. En choisissant convenablement les unités, on peut donc mettre la formule de Newton sous la forme

$$V = \frac{1}{\sqrt{k\mu}}$$

CHAPITRE V

LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

La détermination de la vitesse de la lumière a fait l'objet de nombreux et importants travaux.

Essais de Galilée. — Galilée le premier a recherché par l'expérience si la lumière se propage instantanément ou si, au contraire, il lui faut un temps appréciable pour parcourir une distance donnée (1).

Sa méthode était la suivante :

Deux observateurs A et B, munis chacun d'une lanterne et d'un écran étaient placés à 200 mètres l'un de l'autre. Il était convenu qu'à un moment donné l'observateur A cacherait sa lumière derrière son écran ; l'observateur B devait à son tour cacher la sienne dès qu'il verrait disparaître la première.

Si la propagation de la lumière n'est pas instantanée il doit s'écouler un certain temps entre les disparitions des deux lumières. Or, dans les expériences de Galilée cet intervalle fut toujours inappréciable.

Les Académiciens de Florence. — Il en fut également ainsi dans les essais tentés par les Académiciens de Florence sur une distance de 2 kilomètres.

Si donc la lumière ne se propage pas instantanément, sa vitesse, du moins, doit être très grande.

Observations de Rœmer. 1675. — En 1610, Galilée en dirigeant une lunette vers le ciel découvrit les satellites de Jupiter (2).

---

(1) Le opere di Galileo Galilei ; *Firenza*, t. XIII, p. 45, 1855.

(2) La lunette venait d'être inventée. On sait qu'elle ouvrit un nouveau

A chaque révolution autour de la planète, ces satellites s'éclipsent périodiquement dans le cône d'ombre qu'elle projette à l'opposé du soleil.

Or, en 1675, l'astronome danois Rœmer, qui travaillait alors à l'Observatoire de Paris, venant à comparer les instants de ces éclipses à ceux indiqués par les tables calculées par Cassini, remarqua qu'au moment des oppositions les éclipses devançaient les dates données par les tables, tandis qu'elles retardaient sur ces mêmes dates au moment des conjonctions(1).

Il attribua ces écarts au fait que la lumière du satellite ne se propage pas instantanément, et qu'il lui faut un temps appréciable pour parvenir jusqu'à nous.

Or, la distance de Jupiter à la Terre, au moment des conjonctions, dépasse la valeur de cette distance aux oppositions de tout le diamètre de l'orbite terrestre.

Rœmer conclut de là qu'il fallait à la lumière 22 minutes pour parcourir ce diamètre égal au double de la distance de la Terre au Soleil.

Calculs de Delambre. — Ce nombre est trop élevé, sans doute parce qu'il a été déduit d'un petit nombre d'observations. En discutant, en effet, plus de mille éclipses du premier satellite de Jupiter répartis sur un intervalle de 140 années, Delambre trouva seulement 16′26″4 (2).

La valeur que Rœmer avait obtenue pour la vitesse de la lumière (48 000 lieues) était donc beaucoup trop faible.

Aberration. — Ce phénomène, découvert par Bradley en 1725 consiste en une déviation apparente des rayons lumineux qui nous arrivent des étoiles (3).

Soit un observateur T se déplaçant dans le sens TT′ avec une vitesse v (fig. 11).

Soit A un astre quelconque.

---

champ à l'Astronomie par la découverte des taches du soleil, des montagnes de la lune, des phases de Vénus, etc.

(1) *Hist. de l'Académie des sciences,* t. I, p. 213, 1676.

(2) *Hist. de l'Astr. mod.*, t. II, p. 653, Paris, 1821.

(3) *Phil. Trans.*, t. XXXV, p. 637, 1728.

Tout se passe comme si, l'observateur étant immobile, l'étoile se déplaçait dans le sens AA′ avec la vitesse v.

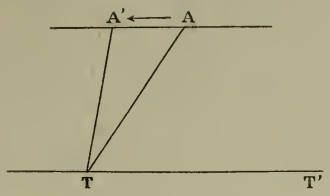


Fig. 11.

Nous supposerons qu'il en soit ainsi.

Désignons par V la vitesse de la lumière et par θ le temps qu'il lui faut pour parcourir la distance AT = D.

L'ébranlement lumineux lancé par l'astre à l'instant t où il est en A se propage suivant la ligne droite AT avec la vitesse V et n'arrive à l'œil de l'observateur qu'au bout du temps θ. Or, pendant ce temps l'étoile s'est déplacée d'une quantité $AA' = v\theta$, si bien que l'observateur la croit en A dans la direction du rayon lumineux qu'il reçoit, tandis qu'en réalité elle se trouve en A′.

Ainsi l'aberration a pour effet de déplacer, dans le sens du mouvement de l'observateur, la position réelle des astres d'une quantité AA′ que l'on trouve égale à

$$\frac{v}{V} \times D.$$

Appliquons ce résultat au cas d'un observateur entraîné

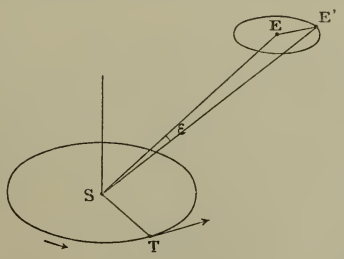


Fig. 12.

autour du soleil s par la rotation annuelle de la terre T (fig. 12).

L'aberration déplace la position réelle de l'étoile d'une quantité $EE' = \frac{v}{V} D$, *parallèle à la vitesse actuelle* de la Terre.

(D représente la distance des deux astres.) Mais à mesure que celle-ci parcourt son orbite, sa vitesse change de direction si bien que la position apparente E′ de l'étoile décrit autour de sa position réelle un tout petit cercle parallèle à l'orbite terrestre ; à chaque instant, la position apparente de l'étoile sur ce cercle s'obtient en menant le rayon EE′ perpendiculaire à ST.

Le petit cercle d'aberration se projette sur la sphère céleste suivant une ellipse dite *ellipse d'aberration annuelle*.

L'angle a sous lequel le demi grand axe de cette ellipse est vu du soleil (ou de la Terre, ce qui revient au même, étant donnée l'immense distance de l'étoile) est égal à

$$\frac{EE'}{D} ;$$

en remplaçant EE′ par sa valeur on obtient

$$a = \frac{v}{V} .$$

Cette quantité a porte le nom de *constante d'aberration*. On voit qu'elle est liée à la vitesse de la lumière par une formule simple d'où la valeur de celle-ci peut être tirée, une fois la constante d'aberration connue par l'expérience.

Le tableau suivant contient les valeurs attribuées à cette constante par les différents astronomes, à la suite de mesures très précises.

Bradley	20″,25
Delambre	20″,255
Bessel	20″,708
Richardson	20″,456
Struve	20″,445 puis 20″,463
Peters	20″,45
Lundhal et Lindhagen	20″,46
Gylden, Wagner et Nyren	20″,49
Küstner	20″,313
Lœwy et Puiseux	20″,445

Quel que soit, du reste, celui de ces nombres que l'on adopte,

la valeur qu'on en déduit pour la vitesse de la lumière dépend de l'exactitude avec laquelle est connu le diamètre de l'orbite terrestre. Ce diamètre est, en effet, nécessaire au calcul de v qui entre dans la formule précédente.

La même objection est applicable aux nombres que l'on déduit de l'observation des satellites de Jupiter.

Toutes ces méthodes donnent d'ailleurs, des nombres assez voisins de 300 000 kilomètres par seconde.

Méthodes physiques. — Pour obtenir plus de certitude sur la valeur de V il n'y avait qu'un moyen : s'affranchir de l'emploi du diamètre orbital de la Terre ou de toute autre distance céleste dont les valeurs ne sont pas connues avec une précision suffisante.

On se trouvait ainsi ramené à l'idée d'opérer sur une distance terrestre et aux expériences de Galilée ; mais alors on retombait sur la difficulté qui avait empêché ce physicien de réussir : l'extrême petitesse de la durée à apprécier. Si l'on adopte, en effet, la valeur approximative (300 000 kilomètres par seconde) fournie par les méthodes astronomiques, on voit qu'à une distance de 3 kilomètres par exemple, correspond une durée de propagation de l'ordre du $\frac{1}{100\,000}$ de seconde.

On a pu arriver cependant à apprécier des intervalles de temps aussi petits, bien plus petits même, grâce à l'artifice de la *roue dentée* et à celui du *miroir tournant*, sur lesquels nous avons maintenant à nous expliquer.

Méthode de la roue dentée. — Imaginons une roue dentée pouvant tourner rapidement autour de son axe.

Supposons-la d'abord au repos et faisons passer un rayon lumineux entre deux dents consécutives.

A une grande distance de la roue recevons normalement ce rayon sur un miroir ; il s'y réfléchit et, revenant sur lui-même il passe de nouveau entre les deux mêmes dents pour tomber enfin dans l'œil de l'observateur.

Ceci posé, animons la roue d'une vitesse v telle qu'un *plein* se substitue exactement à un *creux* pendant le temps que met la lumière pour aller de la roue au miroir et en revenir. Les rayons lumineux qui, au départ, ont traversé un *creux*, rencon-

trent un *plein* au retour et sont arrêtés. L'observateur ne reçoit plus de lumière.

Si la vitesse de la roue est $2\,v$, un *creux* remplace un *creux* pendant le double trajet de la lumière que cette fois l'observateur reçoit tout entière au retour.

Pour des vitesses comprises entre v et $2\,v$, l'observateur ne reçoit évidemment qu'une partie de la lumière émise au départ.

Si donc on augmente progressivement la vitesse de la roue, à partir du repos, l'intensité de la lumière perçue par l'observateur passera par une série de maxima et de minima équidistants.

Il est alors facile, étant connus la vitesse de rotation qui correspond, par exemple, à une extinction de lumière, le nombre de dents de la roue et la distance de celle-ci au miroir, de calculer le temps employé à franchir cette distance ; d'où l'on peut déduire la vitesse cherchée par une simple division.

Cette méthode a été d'abord mise en œuvre par Fizeau à qui nous en sommes redevables.

Expériences de Fizeau, 1849. — La roue dentée était établie à Suresnes et le miroir à Montmartre, c'est-à-dire à une distance de 8 633 mètres (1).

Les expériences, qui eurent lieu la nuit, furent réalisées avec la lumière d'une lampe.

La rotation de la roue était obtenue par un mouvement d'horlogerie à poids dont la vitesse pouvait être réduite à volonté en agissant sur l'un des axes.

Par cette méthode Fizeau a trouvé pour la vitesse de la lumière 315 000 kilomètres par seconde, valeur qui ne doit être considérée que comme approchée, la vitesse de rotation de la roue n'ayant pas été mesurée avec une grande précision. Une commission nommée par l'Académie des Sciences devait répéter les expériences de Fizeau dans le but de réaliser une plus grande précision, mais l'appareil qu'elle avait fait construire est resté inachevé.

Expériences de M. Cornu, 1872-1874. — La méthode de la roue dentée a été reprise par M. Cornu qui a pu y introduire, grâce

(1) *Comptes rendus*, t. XXIX, p. 90 et 132, 1849.

à une discussion approfondie des phénomènes, de nombreux perfectionnements de détail (1).

Ce physicien a opéré d'une part entre l'Ecole polytechnique et le Mont Valérien, distants de 10 310 mètres et d'autre part entre l'observatoire de Paris et Montlhéry dont la distance est de 22 910 mètres. La sensibilité de la méthode se trouvait donc ainsi notablement accrue.

D'un autre côté, au lieu de s'appliquer à réaliser une vitesse de rotation constante ce qui est à peu près impossible, M. Cornu préféra enregistrer soigneusement la loi du mouvement à l'aide d'un cylindre tournant sur lequel divers styles marquaient d'autre part les secondes et les dixièmes de seconde.

Les deux séries d'expériences furent effectuées à l'aide de la lumière Drummond. La première conduisit au nombre de

298 500 km.

et la deuxième au nombre de

300 400 km.

Expériences de Young et Forbes, 1882. — La méthode employée par ces physiciens n'est qu'une simple modification de celle de la roue dentée (2).

Ils se servaient de deux miroirs inégalement distants de la roue dentée et donnant lieu chacun à une image distincte. Dans ces conditions il est facile de voir qu'à partir d'une certaine valeur de la vitesse communiquée à la roue, l'intensité lumineuse de l'une des images va en croissant tandis que l'autre va en diminuant. Pour une valeur déterminée de cette vitesse on arrive à réaliser l'égalité d'éclat des deux images.

La mesure dépend donc d'une observation photométrique. Il existe alors une relation simple entre les distances des miroirs à la roue, le nombre de dents, la vitesse de rotation et enfin la vitesse inconnue de la lumière. On en déduit la valeur de celle-ci.

Les expériences ont été réalisées à Wemyess Bay, près l'embouchure de la Clyde.

---

(1) *Journal de l'Ecole polytechnique*, XLIV^{e} cahier, p. 133, 1872. *Annales de l'Observatoire de Paris* (Mémoires), t. XIII, 1876.

(2) *Phil. Trans.*, 1882.

La vitesse de la roue était mesurée chronographiquement et la lumière employée, la lumière électrique.

Young et Forbes ont ainsi obtenu la valeur de

301 382 km.

Le miroir tournant. — Le miroir tournant a été imaginé en 1834 par Wheatstone et appliqué par lui à la mesure de la vitesse de l'électricité (1).

Les résultats obtenus l'engagèrent à proposer la nouvelle méthode pour comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. La possibilité de ces expériences est nettement indiquée dans diverses lettres adressées à plusieurs savants et en particulier à Arago.

Cette comparaison présentait, comme nous avons déjà eu l'occasion de le dire, la plus haute importance relativement à la détermination de la nature intime des phénomènes lumineux.

Dans la théorie de l'émission, en effet, le rapport $\frac{\sin i}{\sin r}$ du sinus de l'angle d'incidence à celui de l'angle de réfraction est égal au *rapport inverse* des vitesses de la lumière dans les deux milieux en contact.

Supposons que le premier milieu soit l'air, le second étant l'eau. L'expérience montre que le rapport $\frac{\sin i}{\sin r}$ est égal à $\frac{4}{3}$ environ.

Cette quantité étant plus grande que l'unité, la vitesse de la lumière, si l'on adopte le système de l'émission, doit être plus grande dans le second milieu (c'est-à-dire dans l'eau) que dans le premier (c'est-à-dire dans l'air).

La théorie des ondulations conduit, au contraire, à admettre que $\frac{\sin i}{\sin r}$ est égal au *rapport direct* des vitesses dans les deux milieux, c'est-à-dire que la lumière se propage moins vite dans l'eau que dans l'air.

Il suffit donc d'une expérience comparative pour décider entre les deux systèmes.

En 1839, Arago exposa dans les *Annales de Chimie et de*

(1) *Phil. Trans.*, p. 583, 1834.

Physique le détail des expériences qu'il se proposait de réaliser pour trancher définitivement la question. Mais sa vue affaiblie ne lui permit pas de les exécuter.

D'ailleurs, dans son procédé, qui ne différait en rien du procédé primitif appliqué par Wheatstone à la mesure de la vitesse de l'électricité (voy. plus loin, p. 61), la lumière devait être instantanée et pour saisir le faisceau réfléchi il aurait fallu tout autour du miroir divers observateurs munis de lunettes. En répétant l'expérience un grand nombre de fois on pouvait espérer que l'étincelle finirait par éclater au moment précis où le miroir se trouvait dans une position qui lui permît de renvoyer la lumière dans la lunette de l'un des observateurs.

C'était évidemment là une difficulté qui compliquait singulièrement l'observation.

Fizeau et Foucault l'ont résolue, ou du moins tournée, grâce à un artifice ingénieux que nous allons exposer (1).

Imaginons, en effet, que le miroir M soit d'abord au repos et qu'un rayon lumineux SO issu d'une source *continue* quelconque S, après s'y être réfléchi, tombe sur un second miroir M′, concave et fixe, dont le centre de courbure se trouve en O (voy. la fig. 13).

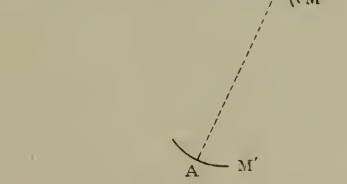


Fig. 13.

Le rayon considéré se réfléchit normalement sur M′, revient sur lui-même et après s'être réfléchi une dernière fois sur M, il revient donner en S une image de la source qui se confond avec la source elle-même.

Si le miroir est animé, dans le sens de la flèche, d'une rota-

(1) Cet artifice a été proposé par Bessel.

tion assez rapide pour qu'il ait le temps de se déplacer d'un angle sensible pendant que la lumière exécute le chemin OAO, le rayon lumineux, rencontrant au retour le miroir dans une position qui n'est plus la même qu'à l'aller, viendra donner en S′ une image de la source qui ne se confond plus avec celle-ci. Le déplacement SS′ varie d'ailleurs en sens inverse de la vitesse de la lumière et peut servir à la mesurer. Pour qu'il soit appréciable, il faut, en général, communiquer au miroir, une vitesse de plusieurs centaines de tours par seconde.

Supposons maintenant qu'on emploie simultanément deux miroirs concaves analogues à M′ et que sur le trajet OM′ relatif à l'un d'eux on dispose une colonne d'eau suffisamment longue. On pourra, par ce procédé, comparer la déviation donnée par le rayon ayant traversé la colonne liquide (deux fois : aller et retour) à celle donnée par le rayon qui s'est propagé dans l'air et réfléchi sur l'autre miroir.

Au moment d'appliquer cette méthode ses auteurs se sont séparés sans qu'ils aient jamais fait connaître le motif de cette séparation. Chacun de son côté exécuta les expériences que nous allons maintenant décrire.

Expériences de Foucault, 1850 [1]. — Le miroir dont il s'est servi était actionné par une petite turbine mue par la vapeur. La rotation de cet appareil était accompagnée d'un son plus ou moins aigu suivant la rapidité avec laquelle elle avait lieu.

La hauteur de ce son était mesurée et servait au calcul de la vitesse de rotation.

La colonne d'eau ayant trois mètres, Foucault trouva que la déviation correspondant au rayon qui l'avait traversé était supérieure à celle donnée par l'autre d'une quantité voisine de $\frac{1}{10}$ de millimètre, facilement observable par conséquent.

La lumière se propage donc moins vite dans l'air que dans l'eau.

Expérience de Fizeau et Bréguet [2]. — De son côté Fizeau, qui s'était adjoint le constructeur Bréguet, arrivait exactement au

(1) *Comptes rendus,* t. XXX, p. 551, 1850, et *Annales de Chim. et de Phys.*, t. XLI, p. 129, 1854.

(2) *Comptes rendus,* t. XXX, p. 562 et 771, 1850.

même résultat. Dans leurs expériences le miroir était entraîné par un mécanisme d'horlogerie dû à Bréguet et capable de lui communiquer une vitesse de 2 000 tours par seconde. Pratiquement ils ont utilisé les vitesses de 5 à 600 tours par seconde.

A la suite de ces expériences décisives il n'y avait plus lieu d'hésiter : la théorie de l'émission formellement condamnée par l'expérience fut définitivement rejetée.

Expériences de Foucault, 1862[1]. — Ce n'est qu'environ dix ans plus tard que Foucault appliqua sa méthode à la détermination de la vitesse absolue de la lumière dans l'air. Cette fois la turbine entraînant le miroir était actionnée par un courant d'air et la vitesse de rotation mesurée stroboscopiquement.

Le nombre qu'il a ainsi obtenu est de 298 000 kilomètres par seconde.

Expériences de Michelson, 1879-1882. — La méthode du miroir tournant a été appliquée dans des conditions bien meilleures par Michelson, en augmentant le trajet parcouru par la lumière [2].

Le déplacement SS′ a pu être ainsi amené à la valeur considérable de 12 centimètres pour une distance OA = 605 m, 8.

Le miroir mobile était plan; il avait 32 millimètres de diamètre et était mû par une turbine à air. Sa vitesse se mesurait par comparaison avec la période d'un diapason entretenu électriquement. Les expériences on eu lieu d'abord à Naval Academy en 1879 et elles ont donné 299910 kilomètres.

Elles ont été répétées en 1882 à Cleveland avec un résultat de 299 853 kilomètres.

Expériences de Newcomb, 1885. — Ce physicien emploie un miroir d'acier poli et nickelé en forme de prisme rectangulaire de 85 millimètres de hauteur sur 6 millimètres de côté.

L'axe de ce miroir pouvait être mû séparément par deux turbines qui l'actionnaient successivement en sens contraire. Par cet artifice on doublait le déplacement de l'image en même

(1) *Comptes rendus*, t. LV, p. 501 et 792, 1862.

(2) *American Journal of Science*, t. XVIII, p. 390, 1879.

temps qu'on supprimait l'influence que pouvait avoir sur le résultat la détermination plus ou moins exacte de la position du zéro.

Cet appareil était installé à Fort-Meyer sur la rive du Potomac. Le miroir fixe fut placé d'abord à l'observatoire Naval, à une distance de 2 551 mètres, puis à Washington-Monument distant de 3 721 mètres.

Le résultat des mesures a été de 299 860 kilomètres, nombre que Newcomb estime exact à 30 kilomètres près (1).

(1) *Astronomical Papers*, part. III et IV, 1885.

CHAPITRE VI

LA VITESSE DE L'ÉLECTRICITÉ

Premiers essais. — Les premiers essais relatifs à la vitesse de l'électricité le long des conducteurs métalliques semblent dus à Deluc. Il déchargeait une bouteille de Leyde dans un circuit comprenant d'une part les tuyaux de conduite des eaux de Genève et d'autre part un fil d'archal servant au retour de l'électricité. Il conclut de ses expériences que la vitesse de ce fluide était trop grande pour pouvoir être mesurée.

En 1748, de nouveaux essais sont réalisés en Angleterre par Watson et conduisent au même résultat. Le circuit comprenait un fil de fer de 2 milles de long (environ 3 500 mètres) et se fermait par le sol.

Ces résultats négatifs n'ont rien qui puissent nous étonner. Aujourd'hui que nous connaissons la valeur énorme de la vitesse de l'électricité, nous pouvons voir que la durée de propagation dans les circuits de Deluc et de Watson était de l'ordre du $\frac{1}{100\,000}$ de seconde ; or, à cette époque on ne connaissait pas de méthode capable de mettre en évidence une aussi petite fraction de temps.

Wheatstone en créant la méthode du miroir tournant, qui permet d'apprécier des durées extrêmement petites, a rendu possible la démonstration de la propagation successive de l'électricité et donné en même temps le moyen d'en mesurer la vitesse.

Principe du miroir tournant. — Il s'agit en somme, de déceler la non-simultanéité de deux phénomènes, très voisins l'un de l'autre dans le temps. Supposons qu'il s'agisse de deux étincelles ε_1 et ε_2 situées sur une même verticale. Examinons-

les par réflexion dans un miroir M animé d'une rotation rapide autour d'un axe vertical AB et supposons, pour simplifier le raisonnement, que chaque étincelle soit instantanée c'est-à-dire

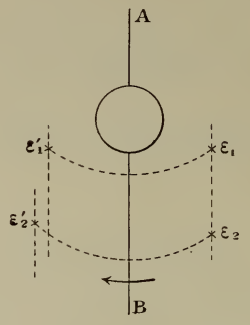


Fig. 14.

de durée infinitésimale. Au moment où la première éclate, un observateur convenablement placé voit apparaître dans le miroir M l'image ε'_1 de cette étincelle; cette image se réduit à un point lumineux qui persiste dans l'œil pendant $\frac{1}{10}$ de seconde (durée de la persistance des impressions rétiniennes). Quand éclate la seconde étincelle ε_2, le miroir M, si sa vitesse est assez grande, aura tourné d'un angle α sensible et l'image ε'_2 de cette seconde étincelle au lieu de se faire sur la même verticale que ε_2 sera déplacée latéralement d'une quantité qui, d'après une propriété connue, correspond à une rotation angulaire 2α du rayon réfléchi.

En vertu de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine la première image n'a pas disparu quand apparaît la seconde. Elles semblent donc coexister simultanément et il est facile d'apprécier entre elles un déplacement latéral même très petit.

Bien plus, la mesure de ce déplacement, si la vitesse du miroir est connue, peut permettre d'exprimer en fraction de seconde l'intervalle de temps qui sépare les deux phénomènes.

Si les deux étincelles ne sont pas instantanées, chacune d'elles apparaît dans le miroir sous la forme d'une traînée lumineuse d'autant plus allongée que la durée de l'étincelle est plus considérable, et il suffira de mesurer le déplacement relatif des

têtes des deux traînées pour avoir la durée qui sépare le commencement de chacun des phénomènes considérés.

On voit qu'il est nécessaire d'animer le miroir de vitesses d'autant plus considérables que la durée à mettre en évidence est plus petite.

Si les deux étincelles à comparer ne sont pas sur une même verticale il faut faire tourner le miroir autour d'un axe parallèle à la droite qui les joint; pour des raisons d'ordre expérimental qu'on devine aisément on s'arrange de manière que cet axe soit vertical ou horizontal.

Expériences de Wheatstone, 1834 (1). — Considérons le circuit ABCD (fig. 15) et faisons communiquer les extrémités A et D de

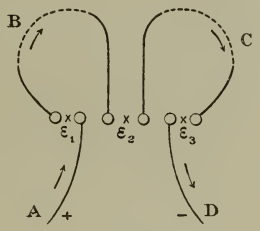


Fig. 15.

ce circuit avec les armatures d'une bouteille de Leyde, celle-ci se déchargera en donnant naissance à trois étincelles ε_1 ε_2 ε_3.

La question est de savoir si ces étincelles sont simultanées ou successives et, dans ce cas, quel est l'intervalle de temps qui les sépare.

Le miroir tournant étant au repos et son axe parallèle à la ligne des étincelles, on aperçoit au moment de la décharge, si l'on a soin de se placer convenablement, trois petits points lumineux qui sont les images des étincelles.

Si l'on met le miroir en mouvement, les trois points lumineux s'allongent dans le sens de la rotation et l'on obtient l'image suivante

(1) *Phil. Trans.*, p. 583, 1834.

preuve que les étincelles ont une durée appréciable. A mesure que la vitesse augmente ces traits s'allongent de plus en plus et, à un moment donné, on constate que celui du milieu commence par retarder sur les autres; ce retard s'accentue au fur et à mesure que la rotation s'accélère.

L'aspect de l'image totale est alors celui-ci

ou cet autre

suivant le sens de la rotation du miroir.

Il résulte immédiatement de là que la propagation de l'électricité n'est pas instantanée. De plus cette expérience montre que l'hypothèse par laquelle on considère le courant comme allant du pôle + au pôle — est tout à fait arbitraire. En effet, si elle était exacte on devrait obtenir un dispositif analogue au suivant ce qui n'a pas lieu; le mouvement qui constitue le courant a donc lieu aussi bien du pôle + au pôle — que du pôle — au pôle +.

Le miroir de Wheatstone était en acier poli de 2,5 centimètres de diamètre. Il tournait (800 tours par seconde) autour d'un axe horizontal et sa vitesse de rotation était déduite de la hauteur du son engendré par une carte frappée à chaque tour par un index fixé à l'axe.

Chacun des fils B et C avait 402 mètres de longueur. Wheatstone trouva, en appréciant à l'œil le déplacement des images qu'il fallait $\frac{1}{1\,152\,000}$ de seconde à l'électricité pour parcourir cette distance.

Il en déduisit que la vitesse de l'électricité dans le fil de cuivre était égale à

$$402 \times 1\,152\,000 \text{ km. par seconde,}$$

soit en chiffres ronds

463 000 km. par seconde.

Un calcul semblable lui fit constater que la durée de chaque étincelle était d'environ $\frac{1}{24\,000}$ de seconde.

Méthode des longitudes. — La méthode dont nous allons parler, de beaucoup plus simple que la précédente, ne put cependant être imaginée qu'une fois la télégraphie électrique inventée et les lignes aériennes complètement installées.

Or, la découverte d'Œrstedt n'eut lieu qu'en 1820 et ce n'est guère qu'à partir de 1837 que le télégraphe électrique commença à fonctionner régulièrement, lorsque le développement des chemins de fer eut permis de placer en toute sécurité les poteaux et les fils à l'abri des barrières protégeant les voies ferrées.

C'est pourquoi, historiquement parlant, la méthode des longitudes vient après celle du miroir tournant.

Supposons qu'on détermine télégraphiquement la différence de longitude de deux observatoires astronomiques, l'une des stations transmettant électriquement à l'autre, l'instant du passage d'une étoile connue à son méridien.

Puisque l'électricité se propage avec une vitesse finie, on doit trouver un écart entre la différence réelle de longitude, mesurée par les méthodes astronomiques, et la différence ainsi évaluée. Cet écart représente la durée de propagation de l'électricité le long de la ligne et peut servir à mesurer la vitesse de cette propagation.

Cette méthode a été effectivement appliquée entre :

Philadelphie et Cambridge par Walker en 1849 [1];

Cincinatti et Pittsburg par O'Mitchell en 1850 [2];

Washington et Saint-Louis par Gould en 1851 [3];

Greenwich et Edimbourg, Greenwich et Bruxelles par les astronomes de ces stations.

Walker avait trouvé 30 000 kilomètres environ pour la vitesse de l'électricité dans le fer.

O'Mitchell obtenait de son côté 45 600 kilomètres et Gould une série de valeurs comprises entre 17.580 et 38 980 kilomètres dans le même métal. Quant aux astronomes de

(1) *Silliman Journal*, t. VII, p. 206 et t. VIII, p. 142, 1849.

(2) *Poggendorff's Annalen*, t. LXXX, p. 161, 1850.

(3) *Silliman Journal*, t. XI, p. 67 et 153.

Greenwich ils opéraient sur le cuivre et ils ont trouvé 12 200 kilomètres entre Greenwich et Edimbourg et 4 300 seulement entre Greenwich et Bruxelles. Remarquons qu'une partie de cette ligne était immergée dans l'eau.

Ces divergences et ces faibles valeurs nous seront expliquées plus loin.

Expériences de Fizeau et Gounelle, 1850. — Le principe de ces expériences est entièrement semblable à celui que nous avons exposé à propos de la vitesse de la lumière par la méthode de la roue dentée (1).

La figure dispensera d'une longue description des appareils. Elle représente schématiquement le dispositif adopté.

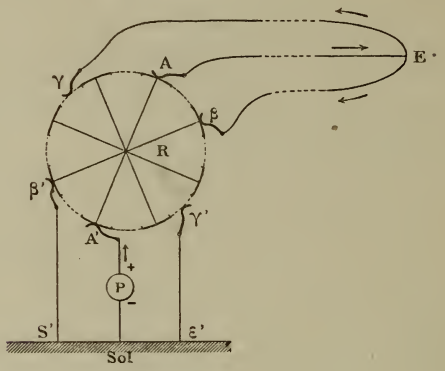


Fig. 16.

R est une roue de bois portant des secteurs en platine (la figure n'en porte que huit ; ils étaient en réalité au nombre de dix-huit). Ces secteurs communiquent métalliquement entre eux de la manière indiquée par le dessin.

Le courant, partant du pôle positif de la pile, par exemple, arrive au balai A′ en communication avec le balai A et se propage dans la ligne A E ; il revient ensuite au sol par le chemin E β β′ S′, le circuit E γ γ′ ε′ n'étant pas fermé.

Faisons tourner la roue avec une grande rapidité.

(1) *Comptes rendus*, t. XXX, p. 437

Soit τ la $\frac{1}{36}$ partie de la durée d'une rotation, c'est-à-dire la moitié du temps qui sépare deux interruptions consécutives du courant dans la ligne.

Supposons que la durée T du trajet A E γ ou A E β soit un multiple pair de τ.

A son retour l'électricité trouvera le disque dans une position analogue à celle de la figure et l'électricité reviendra au sol par la ligne β' S'. Si, au contraire, T est un multiple impair de τ, le circuit E β β' S' étant ouvert, l'électricité reviendra au sol par le chemin fermé E γ γ' ε'. Pour une vitesse intermédiaire le courant de retour se partagera entre les deux fils β' S' et γ' ε'.

Si l'on imagine que les deux fils soient enroulés sur un galvanomètre différentiel on voit que la déviation de celui-ci doit passer par une série de maxima et de minima (ces derniers théoriquement nuls) à mesure que la rotation du disque s'accélère. Le nombre de maxima et de minima réalisés à partir du repos, indique, d'ailleurs, la valeur du multiple de τ qui représente la durée de propagation T dans le circuit ; τ étant connu ainsi que la longueur du trajet parcouru, on aura tous les éléments nécessaires au calcul de V.

Fizeau et Gounelle ont opéré, par ce procédé, sur deux lignes télégraphiques : celle de Paris à Amiens, toute en fer, longue de 314 kilomètres et celle de Paris à Rouen (288 kilomètres partie en fer, partie en cuivre).

Ils trouvèrent 100 000 kilomètres pour la vitesse dans le fer et 180 000 kilomètres pour la vitesse dans le cuivre.

Expériences de MM. Guillemin et Burnouf, 1854 [1]. — Une méthode analogue à la précédente a été employée par MM. Guillemin et Burnouf sur la ligne télégraphique de Toulouse à Foix, longue de 164 kilomètres. Ils ont obtenu dans le cuivre la valeur de 180 000 kilomètres.

Expériences de Siemens, 1875 [2]. — Le dispositif employé par ce physicien est identique à celui dont s'est servi plus tard Blondlot [3] ; seulement il ne prenait aucune précaution spéciale

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, t. LX, p. 385, 1860.

(2) *Pogg. Ann.*, t. CLVII, p. 309, 1876.

(3) Voyez plus loin, p. 70.

pour être sûr que la décharge fût oscillante. Le départ et l'arrivée de l'électricité étaient signalés par deux étincelles qui éclataient à la surface d'un cylindre métallique recouvert de noir de fumée et animé d'une vitesse de rotation connue.

Par ce procédé, Siemens obtint dans le fer une série de valeurs comprises entre 202 600 et 250 600 kilomètres.

Examen critique des expériences précédentes. — Ce qui frappe surtout dans les résultats qui viennent d'être exposés, ce sont les divergences considérables qu'ils présentent et qui semblent indiquer que la vitesse de l'électricité, au moins dans les conditions des expériences, n'est pas une quantité bien définie.

C'est ce qui résulte nettement, du reste, des expériences de M. Fizeau. Ce physicien a constaté, en effet, que la perturbation électrique produite à l'extrémité du circuit se propage en s'estompant pour ainsi dire le long du circuit, de manière à occuper sur le fil une étendue d'autant plus considérable qu'elle s'est propagée plus loin. En d'autres termes, cette perturbation occupe sur le fil une étendue plus grande à l'arrivée qu'au départ (voyez la figure).

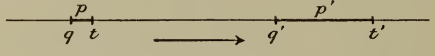


Fig. 17.

Ce curieux phénomène, que Fizeau a appelé *diffusion du courant*, a été découvert par ce savant en remarquant que les déviations de l'aiguille de son galvanomètre différentiel n'étaient pas périodiquement nulles (ce qui aurait eu lieu si la perturbation avait conservé son étendue en se propageant), mais présentaient seulement des minima périodiques non nuls.

Dès lors que fallait-il entendre par vitesse de l'électricité ?

Etait-ce celle de la tête de la perturbation ou celle de la queue ?

Comment, d'ailleurs, mesurer ces deux vitesses ?

Toutes ces questions devenaient inutiles et le problème bien défini si l'on arrivait à supprimer la diffusion du courant, ou, tout au moins à la rendre pratiquement négligeable.

La théorie montre que ce phénomène importun est dû à la résistance que le fil oppose au passage du courant. Mais il est impossible de supprimer cette résistance sans supprimer le fil

lui-même et il semble qu'on soit acculé à une impossibilité. Cependant il est un cas, indiqué par la théorie, dans lequel la vitesse de propagation devient une quantité bien définie ; c'est celui où la perturbation est constituée par un phénomène alternatif. Dans ce cas, en effet, le résidu que laisse derrière elle la tête de la perturbation est d'autant plus faible que la période est plus courte.

Si donc, au lieu de produire à l'origine du fil une simple pulsation électrique, on y excite un mouvement oscillatoire très rapide de l'électricité, la propagation sera exempte de diffusion et la célérité bien définie.

Ce cas théorique n'a pu être réalisé qu'une fois découvertes les oscillations électriques. Dans ces conditions la propagation de l'électricité prend la dénomination plus précise de propagation de l'onde électromagnétique.

L'exposé des méthodes dont on s'est servi pour mesurer la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE VII

VITESSE DE PROPAGATION DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Expériences de M. Blondlot, 1893. — La première mesure de la vitesse de l'onde électromagnétique est due à M. Blondlot qui l'exécuta en 1891. Nous y reviendrons tout à l'heure.

En 1893, il obtenait, par une méthode plus directe, une deuxième valeur de la même quantité [1]. Il opérait sur deux lignes prêtées par la Direction des Postes et Télégraphes. Le départ et l'arrivée de l'oscillation électrique (produite par une bouteille de Leyde) étaient marqués par deux étincelles dont on comparait la position dans le temps au moyen d'un miroir tournant concave [2].

La rotation du miroir séparait — dans le sens du mouvement — les images des deux étincelles. En recevant ces images sur une plaque sensible on fixait le phénomène que l'on pouvait ensuite mesurer à la machine à diviser. De cette mesure on déduisait le temps employé par l'oscillation pour parcourir le fil et, par suite, la vitesse de la propagation.

Les nombres ainsi obtenus sont compris pour la première ligne (longue de 1 029 mètres) entre 292 100 kilomètres et 302 900 kilomètres par seconde, et pour la deuxième ligne (longue de 1 821 m 4) entre 297 500 et 298 500 kilomètres.

Les moyennes respectives ont pour valeurs 296 400 kilomètres et 298 000 kilomètres.

---

(1) *Comptes rendus*, t. CXVII, p. 543, 1893.

(2) Ce miroir avait une ouverture de 4 centimètres et une distance focale de 15 centimètres. Il était mû par une machine Gramme à aimants Jamin actionnée par 28 éléments au bichromate. La vitesse du miroir, déduite de la hauteur du *son d'axe*, était comprise entre 233 et 309 tours par seconde.

Expériences de M. Blondlot, 1891. — Nous avons dit que la première méthode employée par ce physicien n'était pas aussi directe que la précédente. Voici, en effet, le principe sur lequel elle repose (1).

La quantité λ connue sous le nom de longueur d'onde étant égale, par définition, au chemin parcouru par l'onde pendant la durée T d'une période, il suffira de connaître ces deux quantités λ et T pour obtenir, par une simple division, la valeur de la célérité

$$V = \frac{\lambda}{T}. \qquad (1)$$

Or, la longueur d'onde est représentée par le double de l'intervalle qui sépare deux nœuds consécutifs dans les phénomènes d'interférences. Elle est donc facile à déterminer expérimentalement.

Ici se présente une difficulté due à un phénomène particulier connue sous le nom de *résonance multiple* et en vertu duquel la distance des nœuds et des ventres, soit dans l'espace, soit le long d'un fil, est variable avec le résonateur qui sert à en déceler la présence ; autrement dit la longueur d'onde expérimentale dépend du résonateur employé ; elle ne paraît pas dépendre, au contraire, de l'excitateur.

Ce phénomène, complètement expliqué par MM. Poincaré et Bjerknes, indique évidemment la présence dans le résonateur d'une vibration propre de période parfaitement déterminée, calculable par conséquent par la formule générale des oscillations dans un conducteur de faible résistance

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

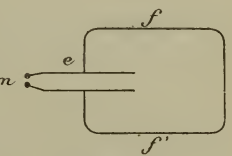


Fig. 18.

période liée d'autre part à la longueur d'onde λ par la relation (1). *C'est donc la période du résonateur* et non celle de l'excitateur qui devra être introduite dans cette relation pour en tirer la valeur de V.

Pour faciliter le calcul de la période, Blondlot a donné à son

(1) *Comptes rendus*, t. CXIII, p. 628, 1891.

résonateur une forme analogue à celle de son excitateur précédemment décrit. Le micromètre à étincelles est en m.

M. Poincaré a montré que la capacité du résonateur ne diffère pas sensiblement de la capacité statique de cet appareil : quant à la self-induction on l'obtient par la formule de Neumann

$$\int \frac{\cos \varepsilon \, ds \, ds'}{r}$$

successivement appliquée aux quatre côtés du rectangle pris deux à deux.

Correction faite d'une erreur qui s'était glissée dans le calcul de la self-induction, les résultats de M. Blondlot s'expriment par une série de douze nombres compris entre

295 500 km.

et

306 800 km.

Ces nombres correspondent à douze longueurs d'onde différentes dues à douze résonateurs successivement employés.

La moyenne de ces mesures est de

303 800 km.

Elle est seulement de

302 850 km.

si l'on fait abstraction des deux dernières mesures que l'auteur considère comme moins certaines.

Mesures directes. — La méthode précédente est sujette à diverses critiques dont la plus importante est relative à l'emploi de la formule de Neumann.

Cette formule a été établie, en effet, pour un circuit métallique entièrement fermé. Or, dans le résonateur de Blondlot le circuit se ferme à la fois par l'étincelle du micromètre et par les lignes de force normales aux plaques du condensateur.

Le calcul de la période se trouve donc entaché d'une incertitude qui se reporte sur la valeur de la vitesse de propagation.

Dans les méthodes qui nous restent à décrire, la période est

expérimentalement mesurée ainsi que la longueur d'onde. La valeur obtenue pour la célérité est alors complètement indépendante de toute hypothèse.

Difficultés. — La mesure expérimentale de la période se fait par le miroir tournant, comme nous l'avons vu pour les expériences de Feddersen. Or, à une période d'oscillation de un millionième de seconde correspond une longueur d'onde de 300 mètres. Si donc on ne dispose pas d'une aussi grande étendue — et c'est ce qui a lieu le plus souvent — il faudra employer des oscillations plus rapides ; mais alors, pour les dissocier par le miroir, il sera nécessaire d'animer celui-ci de vitesses considérables, ce qui entraîne de grandes difficultés mécaniques.

La solution du problème consistera donc à se placer dans des conditions moyennes où la longueur d'onde ne soit ni trop grande, ce qui en rendrait la mesure impossible, ni trop petite, afin que l'oscillation puisse être analysée par un miroir animé de vitesses pratiquement réalisables.

Expériences de Duane et Trowbridge, 1895 (1). — Un premier circuit composé d'un condensateur *abc*, *a'b'c'* et de deux tiges de longueurs variables *t* et *t'* est actionné par une bobine d'induction. L'étincelle de décharge éclate en *e*. Ce circuit primaire joue le rôle d'excitateur.

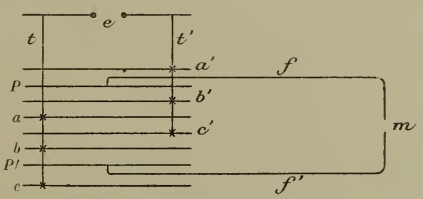


Fig. 19.

Un circuit secondaire, composé des plaques P et P', des deux longs fils parallèles *ff'* et du micromètre *m*, est mis en vibration par l'induction que le premier exerce sur lui. L'état

(1) *American Journal of Science*, t. XLIX, p. 297, 1895, et *Philosophical Magazine*, t. XL, 1895.

vibratoire des fils parallèles est étudié au moyen du bolomètre dont les déviations mettent en évidence les nœuds et les ventres de vibration.

Le circuit primaire possède une capacité relativement grande et une self-induction faible ; c'est l'inverse qui a lieu pour le circuit secondaire. On conçoit donc qu'en réglant convenablement la longueur des tiges t et t' on puisse réaliser entre les deux circuits la condition

$$CL = C'L'$$

qui exprime, d'après la formule de Thomson, que leurs périodes de vibration sont égales. On dit alors que les deux circuits sont à l'unisson.

On reconnaît que cette condition est réalisée à ce fait que la différence des déviations bolométriques aux nœuds et aux ventres présente une valeur maxima. Il est alors facile de mesurer avec précision la distance de deux ventres consécutifs. Le double de cette distance donne λ.

D'autre part, on fixe sur une plaque sensible l'image de l'étincelle m convenablement dilatée par un miroir tournant. Les oscillations du secondaire étant, en général, peu amorties, on obtient sur la plaque un nombre d'oscillations suffisamment grand pour permettre une mesure précise de la période.

Les résultats obtenus par cette méthode s'expriment par les nombres du tableau suivant :

$\lambda = 58{,}88$ m ; $\omega = 70$ tours par seconde.

$V =$	281 900 km par seconde.
	281 000 —
	283 500 —
	280 800 —
	280 800 —
Moyenne $V =$	281 600 km par seconde.

Les auteurs ont eu la curiosité de mesurer aussi la période de l'étincelle primaire e et d'introduire sa valeur dans la formule $V = \frac{\lambda}{T}$.

Ils ont ainsi obtenu

$$V = 298\,800 \text{ km.}$$

valeur notablement supérieure à celle qui résulte de l'emploi

dans le calcul de la période secondaire. Ce désaccord prouve que l'unisson des deux circuits laissait beaucoup à désirer.

Dans une deuxième série d'expériences la capacité du condensateur avait été notablement diminuée afin d'amoindrir en même temps l'amortissement des oscillations primaires. Cette précaution permettait une réalisation plus parfaite de l'unisson. Le dispositif des appareils est représenté par le schéma suivant :

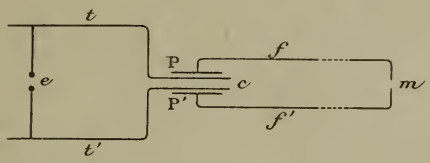


Fig. 20.

La présence de l'étincelle secondaire *m* produisant des perturbations gênantes pour la mesure de la longueur d'onde, on la supprimait pour établir l'unisson (en amenant les pointes du micromètre au contact), on mesurait λ, puis on rétablissait l'étincelle pour la mesure de la période.

Voici les résultats de cette deuxième série d'expériences.

λ	V
56,70 m	303 000 km.
56,70	302 200
56,70	292 300
56,90	300 000
56,90	303 600
56,90	299 600
56,60	301 400
Moyenne. .	300 300 km par seconde.

Expériences de Saunders, 1896 [1]. — Dans ces expériences il y a encore un circuit primaire et un circuit secondaire disposés comme l'indique la figure.

La résonance des deux circuits est obtenue de la manière indiquée par Lodge ; la longueur d'onde de l'oscillation secon-

(1) *Physical Review*, t. XX, p. 81, 1896.

daire est alors égale à quatre fois la longueur du circuit ($\lambda = 4l$).

L'auteur a d'ailleurs préalablement vérifié cette formule sur

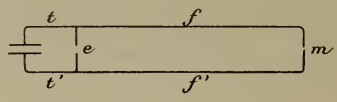


Fig. 21.

des circuits relativement courts. Le miroir, en acier poli, avait été construit pour le professeur Michelson après ses derniers travaux sur la vitesse de la lumière. Son axe était monté sur diamant et sa rotation obtenue par une turbine à air ; sa vitesse était déterminée par la méthode stroboscopique appliquée sous une forme particulière.

Le nombre de vibrations du diapason employé à cet effet était déterminé selon la méthode de lord Rayleigh par comparaison avec une horloge dont les variations diurnes étaient mesurées astronomiquement.

Les résultats obtenus sont les suivants :

$\lambda = 2\,223{,}68$ m	$\omega = 49{,}742\ t$	par seconde.	$V = 293\,400$ km.
	$\omega = 74{,}613$	—	$V = 295\,400$
$\lambda = 1\,662{,}76$ m	$\omega = 49{,}552$	—	$V = 299\,400$
	$\omega = 74{,}328$	—	$V = 299\,800$
$\lambda = 1\,201{,}20$ m	$\omega = 49{,}552$	—	$V = 299\,800$
	$\omega = 74{,}328$	—	$V = 299\,500$
	$\omega = 99{,}104$	—	$V = 299\,900$

La moyenne de tous ces nombres est de 298 200 kilomètres par seconde.

Conclusion. — Toutes ces méthodes donnent la valeur de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique le long d'un fil métallique. Or, la lumière ne se propage point par un mécanisme semblable. Elle rayonne librement dans l'espace. Pour pouvoir comparer la vitesse de la lumière à celle de l'onde électromagnétique il faudrait que celle-ci fût déterminée dans des conditions identiques, c'est-à-dire dans une libre propagation à travers l'espace.

De nouvelles mesures ne sont pas nécessaires pour cela.

L'expérience et le calcul ont montré comme nous l'avons dit

précédemment que la célérité de l'onde électromagnétique est la même dans la propagation le long d'un fil et dans le libre rayonnement à travers un milieu identique à celui qui entoure le fil.

Les nombres qui précèdent représentent donc la valeur de la célérité de l'onde électromagnétique *dans l'air*. Les méthodes physiques employées à la mesure de la vitesse de la lumière donnent aussi la valeur de cette vitesse *dans l'air*. Les deux séries de nombres sont donc directement comparables.

Nous les avons réunies dans le tableau suivant :

Vitesse de la lumière en kilomètres par seconde.

Fizeau, 1849	315 000
Foucault, 1862	298 000
Cornu, 1872	298 500
Cornu, 1874	300 400
Michelson, 1879	299 910
Michelson, 1882	299 853
Young et Forbes, 1882	301 382
Newcomb, 1885	299 860

Vitesse de l'onde électromagnétique en kilomètres par seconde.

Blondlot, 1891	302 850
Blondlot, 1893	296 400
id. id.	298 000
Duane et Trowbridge, 1895	281 600
id. id. id.	300 300
Saunders, 1896	298 200

La comparaison est immédiate et permet de formuler la conclusion suivante sur laquelle nous reviendrons plus loin.

La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est sensiblement égale à celle de la lumière.

CHAPITRE VIII

LE NOMBRE v DE MAXWELL

Divers systèmes d'unités. — Toutes les grandeurs électriques et magnétiques peuvent s'exprimer en fonction de l'une d'elles et de quantités géométriques ou mécaniques convenables.

Il suffit donc, les unités géométriques et mécaniques étant préalablement définies, de définir à nouveau une seule unité électrique ou magnétique pour que toutes les autres soient parfaitement déterminées.

On pourrait constituer ainsi autant de systèmes d'unités qu'il y a de grandeurs électriques ou magnétiques distinctes.

Les deux systèmes généralement utilisés sont : le système électrostatique et le système électromagnétique.

Système électrostatique. — L'unité que l'on définit arbitrairement dans ce système est l'unité de *quantité d'électricité*. Toutes les autres (unité de capacité, unité de potentiel, unité de masse magnétique, etc.) se déduisent de celle-là. On prend pour unité électrostatique u de quantité d'électricité celle qui produit, sur une quantité égale située à l'unité de distance, une répulsion égale à l'unité.

Système électromagnétique. — Dans ce système, l'unité qu'on choisit arbitrairement est celle de *masse magnétique*. On la définit par la condition qu'elle repousse avec une force égale à l'unité une masse égale située à l'unité de distance.

L'unité de magnétisme étant ainsi définie, toutes les autres unités en dérivent et en particulier l'unité de quantité d'électricité.

Soit u' l'unité électromagnétique de quantité d'électricité.

Désignons alors par q et q' les valeurs numériques d'une

quantité d'électricité successivement mesurée dans l'un et l'autre système. Nous avons évidemment

$$\frac{q}{q'} = \frac{u'}{u}$$

et, comme nous avons posé (voy. p. 28).

$$\frac{q}{q'} = v,$$

il vient immédiatement

$$\frac{u'}{u} = v.$$

Le nombre v. — Si nous venons à comparer entre elles de la même manière chacune des unités électriques et magnétiques exprimées dans l'un et l'autre système, nous obtiendrons une série de rapports que nous trouverons toujours égaux soit à v ou à $\frac{1}{v}$, soit à v^2 ou à $\frac{1}{v^2}$.

La valeur du nombre v est donc utile à connaître. Elle permettra, en effet, de passer rapidement des unités électrostatiques aux unités électromagnétiques et vice versa.

On montre aisément que ce rapport peut être considéré comme le quotient d'un espace par un temps. On exprime ce fait en disant que le nombre v a les dimensions d'une vitesse.

Calcul de Kirchhoff. — Cette proposition n'est pas seulement une formule spéculative plus ou moins intéressante. Elle correspond à une réalité physique.

Kirchhoff a montré, par le calcul, que le nombre v représente la vitesse avec laquelle se propage une perturbation électrique le long d'un conducteur.

Théorie de Maxwell. — Dans la théorie de Maxwell le nombre v représente la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans l'espace, ou ce qui revient au même le long d'un fil conducteur plongé dans un milieu identique à celui qui constitue ce même espace.

La mesure de ce nombre constituera donc une détermination

indirecte de la quantité dont nous nous occupons, savoir : la célérité de l'onde électromagnétique.

Diverses méthodes. — Trois méthodes différentes ont été appliquées à la mesure de v.

On peut, en effet, comparer expérimentalement les valeurs électrostatique et électromagnétique d'une *quantité d'électricité*, d'une *force électromotrice* ou d'une *capacité*.

La première méthode seule est indépendante de tout autre mesure et complète par elle-même. Les deux autres exigent la connaissance exacte d'une résistance (l'ohm) en valeur électromagnétique absolue ; mais, en elles-mêmes, elles sont susceptibles d'une plus grande précision que la première.

Les déterminations du nombre v ont été extrêmement nombreuses.

La première en date est celle de Weber et Kohlrausch fondée sur l'évaluation d'une quantité d'électricité.

La plus récente a été effectuée par la méthode des capacités appliquée d'une manière nouvelle et très élégante que nous allons décrire. Nous donnerons ensuite les résultats obtenus par les différents expérimentateurs.

Méthode de Miss Margaret Maltby. — Supposons qu'on fasse propager dans le système conducteur indiqué par le dessin une série d'oscillations électriques de période T.

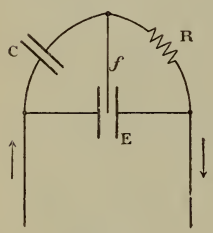


Fig. 22.

En général la feuille f de l'électromètre de Hankel E sera déviée. Cependant, si la capacité C, la résistance R et la période T satisfont à la relation

$$T = \pi CR,$$

cette feuille restera immobile.

L'appareil producteur d'oscillations électriques est l'excitateur de Blondlot qui permet, sans trop de difficultés, le calcul de la période T.

D'autre part il est facile de déterminer R en unités électromagnétiques. La formule précédente donnera donc la valeur électromagnétique de la capacité C. Sa valeur électrostatique étant aisément calculable, il est facile d'obtenir v.

Résultats. — Le tableau suivant renferme les résultats donnés par les différentes méthodes. Les lettres Q, E et C signifient : quantité d'électricité, force électromotrice, capacité, et désignent la méthode employée par chaque expérimentateur.

		v	
1856.	Weber et Kohlrausch (Q)	310 740 km.	(1)
1868.	Maxwell (E)	284 100	(2)
1869.	W. Thomson et King (E)	280 800	(3)
1873.	Dugald et Mac Kichan (E)	289 600	(4)
1879.	Ayrton et Perry (C)	296 000	(5)
1880.	Shida (E)	295 500	(6)
1881.	Stoletow (C)	299 000	(7)
1881.	Klemencic (C)	301 900	(8)
1882.	Exner (E)	292 000	(9)
1883.	J.-J. Thomson (C)	296 300	(10)
1884.	Klemencic (C)	301 800	(11)
1886.	Klemencic (C)	301 420	(12)
1886.	Himsted (C)	300 330	(13)
1887.	Himsted (C)	304 900	(14)
1888.	Himsted (C)	300 920	(15)
1889.	Lord Kelvin (E)	300 400	(16)
1889.	Rosa (C)	300 040	(17)
1889.	Rowland (C)	298 150	(18)

(1) *Electrodynamische Maasbestimmungen*, Bd. III, p. 221, Leipzig, 1857.
(2) *Phil. Trans.*, p. 643, 1868.
(3) *Rep. Brit. Ass.*, p. 434, 1869.
(4) *Phil. Trans.*, p. 409, 1873.
(5) *Phil. Mag.*, t. VII, p. 277, 1879.
(6) *Phil. Mag.*, t. X, p. 431, 1880.
(7) *Journal de physique*, t. II, p. 468, 1881.
(8) *Sitzungsberichte Wien*, t. LXXXIII, p. 603, 1881.
(9) *Sitzungsberichte Wien*, t. LXXXVI, 1882.
(10) *Phil. Trans.*, p. 707, 1883.
(11) *Sitzungsberichte Wien*, t. LXXXIX, 1884.
(12) *Sitzungsberichte Wien*, t. XCIII, p. 470, 1886.
(13) *Wied. Ann.*, t. XXIX, p. 560, 1887.
(14) *Wied. Ann.*, t. XXXIII, p. 1, 1888.
(15) *Wied. Ann.*, t. XXXV, p. 126, 1888.
(16) *The theory and pratic of absolute measurements*, etc., vol. II, part. II, p. 616.
(17) *Phil. Mag.*, t. XXVIII, p. 315, 1889.
(18) *Phil. Mag.*, t. XXVIII, p. 304, 1889.

		ν	
1890.	J.-J. Thomson et Searle (C).	299 950 km.	[19]
1891.	Pellat (E)	300 920	[20]
1892.	Abraham (C).	299 120	[21]
1896.	Hurmuzescu (E).	300 100	[22]
1897.	Miss Margaret Maltby (C)	301 500	[23]

Conclusion. — La mesure du nombre ν donne pour la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique une valeur qui ne paraît pas différer de celles que l'on obtient par la mesure directe de cette quantité.

La conclusion de toutes les mesures directes ou indirectes est donc identique : l'onde électromagnétique se propage avec la vitesse de la lumière.

---

(19) *Phil. Trans.*, p. 583, 1890.
(20) *Comptes rendus*, mai 1891.
(21) *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVII, p. 433, 1892.
(22) *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. X, p. 433, 1897.
(23) *Wied. Ann.*, t. LXI, p. 553, 1897.

CHAPITRE IX

DE LA DISPERSION DANS LE VIDE

Considérations générales. — Pour être rigoureusement exacte la conclusion qui précède devrait être formulée d'une manière un peu différente. Il conviendrait de dire : « La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est *sensiblement* égale à celle de la lumière. »

Rien ne prouve, en effet, que cette égalité soit absolue et qu'il n'y ait pas entre ces deux quantités un écart réel, quoique petit.

Tout ce que nous savons des propriétés de l'onde lumineuse et de l'onde électromagnétique nous a conduit à admettre leur identité de nature ; toutes deux sont dues aux vibrations de l'éther ; mais encore ne faut-il pas oublier que les vibrations électriques obtenues jusqu'ici ne dépassent pas 300 billions par seconde, tandis que les vibrations lumineuses comprises, du rouge au violet, entre 400 et 800 trillions par seconde, sont au moins mille fois plus rapides.

A priori, rien ne permet d'affirmer que la vitesse de propagation d'une vibration soit indépendante de sa période. Au contraire, il serait étonnant de rencontrer là une constance qui n'existe pour aucune autre quantité physique ou mécanique.

La probabilité de cette variation — en dehors de la considération très générale que nous venons de produire — résulte aussi du fait que la période de vibration d'un milieu élastique est fonction de l'élasticité de ce milieu. Or, l'éther propage des vibrations de périodes extrêmement diverses. Il faut donc admettre qu'il se comporte comme un milieu d'élasticité variable suivant la vibration qu'il transmet.

La vitesse de propagation — fonction aussi de l'élasticité, — doit donc varier avec la période de la vibration transmise.

On peut prévoir le sens de cette variation.

D'une part, en effet, la période de vibration est d'autant plus courte que le milieu est plus élastique et, d'autre part, la vitesse de propagation croît avec l'élasticité. Les vibrations les plus rapides doivent donc se propager plus vite que les autres.

Si cette conclusion est exacte, la vitesse de la lumière doit être plus grande que celle de l'onde électromagnétique et celle de la lumière violette plus grande que celle de la lumière rouge.

Le phénomène que nous considérons, s'il existe, doit donc se traduire, conformément au langage usité, par une *dispersion* des différentes radiations transmises par l'éther ; *dispersion dont le sens serait inverse de celle qui se produit dans les milieux transparents* ; dans ce dernier cas, en effet, ce sont les vibrations les moins rapides qui se propagent le plus vite ; le violet va moins vite que le rouge. Nous donnerons à la dispersion que nous considérons le nom de *dispersion dans le vide*, ce dernier mot désignant, non pas le vide philosophique absolu, mais le vide physique constitué par l'éther libre.

Ces considérations toutes théoriques trouvent-elles une confirmation dans l'expérience ?

Les nombres donnés pour la vitesse de la lumière et surtout pour celle de l'onde électromagnétique ne sont pas assez précis pour qu'on puisse affirmer qu'il n'y ait pas entre les valeurs réelles de ces deux quantités une différence de plusieurs milliers de kilomètres.

D'autre part l'incertitude qui reste sur la valeur de la vitesse de la lumière blanche permet de supposer, entre le rouge et le violet, une dispersion qui s'élève au plus au double de l'erreur probable commise sur la valeur moyenne de cette vitesse.

En tous cas, la dispersion dont il s'agit ne peut qu'être faible et difficile à mettre en évidence.

Cependant plusieurs faits semblent révéler son existence d'une manière assez nette pour mériter l'attention des physiciens.

Observation des satellites de Jupiter. — C'est Newton qui, le premier, semble avoir posé la question de savoir si les

rayons de différentes couleurs se propagent avec la même vitesse dans le vide. Dans une lettre à Flamsteed (1691) il indique l'observation des éclipses des satellites de Jupiter comme pouvant résoudre la question.

Si le dernier rayon émis par le satellite reste blanc, c'est que toutes les couleurs se propagent avec la même vitesse. S'il y a dispersion, au contraire, et si cette dispersion a le sens que nous lui avons supposé, le dernier rayon doit paraître rouge, car, alors, les diverses radiations simples qui constituent la dernière pulsation lumineuse envoyée par le satellite ne se propageant pas avec la même vitesse et le rouge arrivant après toutes les autres, l'impression finale doit tirer sur cette couleur. A l'instant de l'émersion, au contraire, le premier rayon qui atteint l'œil doit paraître violacé. Cette dernière observation est plus difficile que la précédente, l'impression violette étant immédiatement suivie d'impressions colorées diverses qui reconstituent du blanc, éblouissent l'œil et effacent l'impression initiale.

Du reste, aussi bien aux immersions qu'aux émersions, cette méthode n'a donné aucun résultat, ce qui tient sans doute à la présence de l'atmosphère jovienne qui empêche l'éclipse d'être brusque.

Arago a proposé une autre méthode qui consiste à observer l'ombre portée du satellite sur la planète et à voir si cette ombre est bordée de bandes colorées à ses bords antérieurs et postérieurs. Bien que le contraste de la lumière avec l'ombre du satellite facilitât l'observation, cette méthode n'a également rien donné.

Observation des étoiles variables. — Arago a proposé pour résoudre la question l'observation des étoiles variables. La diminution d'intensité équivalant à une suppression de lumière, la couleur de l'étoile doit changer en même temps que son éclat, et, dans notre hypothèse, paraître plus rouge pendant la période d'affaiblissement que pendant celle de la croissance lumineuse.

Les observations d'Arago sur *Algol* (β Persée) ne lui ayant donné aucun résultat, il avait admis que la dispersion n'existe pas dans le vide. Il semble résulter cependant d'observations nombreuses dues à Schmidt que, pendant leur période d'affaiblissement, les étoiles variables sont un peu plus rouges que

pendant l'augmentation d'intensité (1). D'autre part quelques observations de M. Belopolsky sur β Lyre tendent à la même conclusion.

Observation de MM. Young et Forbes. — Dans leurs expériences relatives à la mesure de la vitesse de la lumière, Young et Forbes ont fait une curieuse observation qui semble confirmer les observations précédentes.

Ils se servaient, comme nous l'avons vu, de la méthode de la roue dentée et cherchaient à réaliser l'égalité d'éclat de deux images données par deux miroirs placés à des distances différentes de la roue.

Or, l'image dont l'éclat diminuait à mesure que la roue tournait plus vite paraissait colorée en bleu, tandis que l'autre, dont l'éclat allait en croissant, paraissait colorée en rouge.

Le rouge et le bleu doivent être considérés ici comme deux couleurs complémentaires dont la superposition reproduirait la lumière blanche employée.

L'extinction et la réapparition du rouge précédant celles du bleu, c'est-à-dire ayant lieu pour une vitesse de rotation moindre, il faut en conclure que la vitesse de la lumière rouge est plus petite que celle de la lumière bleue.

Cette explication est d'ailleurs donnée par les physiciens mêmes qui ont observé le fait.

Observation des étoiles orbitales. — Les méthodes de l'analyse spectrale, fondées sur le principe de Doppler-Fizeau, ont permis d'attribuer à certaines étoiles variables un mouvement orbital dont la période a pu être déterminée avec précision.

Pour bien comprendre comment la comparaison de l'éclat de l'étoile avec sa position sur son orbite peut permettre d'étudier la question qui nous occupe, il est bon de dire quelques mots du principe auquel nous venons de faire allusion et de son application à la détermination des vitesses radiales des étoiles.

Principe de Doppler-Fizeau. — Considérons une source lumineuse S, une étoile par exemple, animée dans la direction SS′ d'un mouvement de translation dont nous désignerons la vitesse par u.

---

(1) *Astronomische Nachrichten,* t. XCVIII, p. 88.

Cette source émet des ondes que l'on peut considérer comme planes à une grande distance du centre d'émission.

A l'instant initial la source lumineuse est en S et elle émet une onde O qui au temps t est parvenue à une distance $SA = Vt$ du point S.

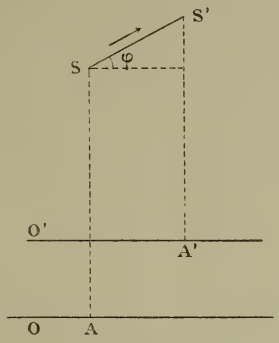


Fig. 22.

Soit T la période de vibration, $SS' = uT$ le chemin parcouru par la source pendant le temps T.

A l'instant T, la source est en S' et elle émet une nouvelle onde qui, au temps $t + T$ a atteint la position O' à une distance $S'A' = V(t + T)$ du point S'.

La distance de deux ondes consécutives est donc égale à

$$SA + uT \sin \varphi - S'A'.$$

c'est-à-dire, en remplaçant SA et S'A' par leurs valeurs, à

$$T(V + u \sin \varphi).$$

Le déplacement de la source par rapport à l'observateur a donc pour effet de substituer à la longueur d'onde réelle $\lambda = VT$ de la vibration une longueur d'onde apparente λ' donnée par la relation.

$$\lambda' = T(V + u \sin \varphi).$$

Dans le cas où la source s'approche de l'observateur au lieu de s'en éloigner on trouverait par le même procédé :

$$\lambda' = T(V - u \sin \varphi).$$

Analyse spectrale. — Si l'on compare le spectre d'une étoile à celui d'une source terrestre convenable, on ne tarde pas à constater que les raies brillantes caractéristiques d'un métal donné n'occupent pas dans le spectre de l'étoile la même position que dans celui de la source terrestre. Les raies de l'une sont, en général, légèrement déplacées par rapport aux raies de l'autre, ce qui résulte évidemment de la variation apparente de longueur d'onde due au déplacement relatif de la source. Ce déplacement peut être mesuré micrométriquement et sa valeur permet de calculer le rapport $\frac{\lambda'}{\lambda}$.

En introduisant cette dernière valeur dans la relation

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = 1 - \frac{u \sin \varphi}{V},$$

on pourra, V étant connu, en déduire la valeur de $u \sin \varphi$.

Cette quantité, qui représente la composante de la vitesse relative de l'étoile le long du rayon qui va de l'observateur à l'étoile, a reçu le nom de *vitesse radiale*. En mesurant ainsi les vitesses radiales de certaines étoiles, on n'a pas tardé à remarquer qu'elles changeaient périodiquement de signe en variant, du reste, d'une manière continue.

Cela ne pouvait résulter que d'un mouvement orbital de l'étoile dont la période se trouvait ainsi mesuré avec précision.

Remarque de M. Tikhoff (1). — M. Tikhoff a eu l'idée de comparer les courbes des vitesses radiales de δ Céphée et de η Aigle données par M. Belopolsky aux courbes d'éclat des deux mêmes étoiles, d'après Argelander, et il a constaté une coïncidence remarquable entre les maxima et les minima périodiques de ces courbes avec cette particularité toutefois que la courbe d'éclat présente sur la courbe des vitesses radiales un retard qui est de vingt-six heures pour δ Céphée et de quarante-six heures pour η Aigle.

Or ces deux étoiles appartiennent à la catégorie des étoiles orangées. Les courbes d'éclat qui leur correspondent sont donc relatives à la radiation $\lambda = 600$ environ, tandis que les courbes des vitesses radiales ont été obtenues par l'observation des raies spectrales au voisinage $\lambda = 440$.

(1) *Mémoria della Societa degli Spettroscopisti italiani*, t. XXVII, 1898.

Le retard observé signifie donc que la radiation $\lambda = 600$ se propage moins vite que la radiation $\lambda = 400$, ou, ce qui revient au même, que la lumière violette se propage plus vite que la lumière rouge.

Conclusion. — Il paraît donc probable qu'il y a réellement dans le vide une dispersion inverse de celle qui existe dans les milieux transparents. De nouvelles expériences sont évidemment nécessaires pour confirmer les observations précédentes.

L'exploration de ce champ nouveau et inattendu ne pourra manquer d'apporter à la science — tant au point de vue expérimental qu'au point de vue théorique — d'utiles et intéressantes découvertes.

CHAPITRE X

L'ÉTHER DE MAXWELL

Constitution de l'éther. — Il est temps de nous demander si le mécanisme par lequel nous avons expliqué la propagation d'une perturbation dans l'éther possède une réalité objective, ou s'il n'est pas autre chose qu'une manière simple et commode d'envisager les faits.

Nous avons considéré le milieu élastique qui propage les vibrations comme composé de molécules qui transmettent de proche en proche le mouvement qu'elles reçoivent des molécules matérielles.

Ceci nous oblige à admettre qu'il y a entre ces molécules des liaisons déterminées ou, si l'on veut, un certain système de forces mutuelles.

Or, en faisant cette hypothèse, nous retombons en plein sur la difficulté qu'il s'agissait d'éviter, savoir : l'action à distance.

Comment, en effet, la force émanée d'une molécule d'éther peut-elle agir sur les molécules voisines, si les intervalles moléculaires de l'éther sont vides, au sens absolu du mot ?

Il faut donc chercher autre chose.

M. Poincaré a montré, qu'une fois imaginé un mécanisme particulier donnant l'explication des phénomènes dont l'éther est le siège, on peut en trouver une infinité d'autres remplissant tout aussi bien les mêmes conditions.

La question est donc de déterminer celui de ces systèmes qui correspond à la réalité des faits.

On comprend tout ce qu'il y a dans ce problème de difficultés sans doute insurmontables.

Théorie de Maxwell. — Il est bon de signaler, parmi tous les systèmes possibles, celui qui a été imaginé par Maxwell, non

pas qu'il soit plus près de la vérité qu'un autre, cette question ne pouvant être tranchée, au moins actuellement, mais parce qu'il se plie d'une manière simple à l'explication de la plupart des faits connus.

Maxwell regarde l'éther comme constitué par de petites sphères animées de mouvements de rotation très rapides qu'elles se transmettent de proche en proche.

Ces sphères sont d'ailleurs de deux sortes.

Les unes, que Maxwell appelle *cellules*, donnent naissance par leur rotation à des tourbillons moléculaires d'où dérive la force magnétique. Les autres servent à transmettre la rotation d'une cellule à la cellule voisine sans en changer le sens.

Ces dernières sphères ou particules constituent l'électricité qui se trouve être dans cette théorie une sorte de matière.

Tourbillons moléculaires. — Imaginons une série de cellules toutes centrées sur une courbe quelconque S et ayant pour axes de rotation les éléments infiniment petits de cette courbe.

Par suite de son mouvement de rotation chaque cellule s'aplatit suivant son axe et s'élargit dans toutes les directions perpendiculaires.

Ces deux effets donnent naissance dans le milieu à deux actions bien distinctes : une tension suivant la tangente à la courbe S et une pression latérale dirigée en tous sens dans le plan normal à cette courbe.

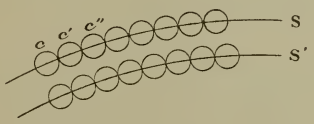


Fig. 23.

La tension constitue la force magnétique. La courbe S est donc une ligne de force. Quant aux pressions latérales elles ont pour effet de développer entre deux lignes de forces voisines des répulsions qui expliquent parfaitement la distribution du spectre magnétique.

Grâce aux petites sphères d'électricité qui transmettent la rotation de l'une à l'autre, deux tourbillons moléculaires voisins S et S′ ont toujours le même sens de rotation.

Déplacement électrique. — Maxwell admet que, dans les diélectriques, les particules d'électricité ne peuvent subir que des déplacements très petits. Si ces déplacements ont lieu en même temps, dans la même direction, ils exercent sur les cellules adjacentes des efforts tangentiels qui contrebalancent leurs actions aux deux extrémités opposées d'une même cellule.

Celle-ci reste donc en repos et le seul effet du déplacement électrique est de déformer les cellules de proche en proche en développant dans le milieu une réaction élastique qui constitue la force électrique.

Courant électrique. — Dans un conducteur, au contraire, les particules d'électricité peuvent se déplacer d'une manière continue au travers des cellules en produisant un courant.

Le frottement de ces particules contre les cellules donne lieu aux deux effets suivants :

1° A un dégagement de chaleur, ce qui est conforme à l'expérience (chaleur de Joule).

2° A un mouvement de rotation des cellules.

Considérons plus particulièrement le cas d'un fil cylindrique conducteur.

Le déplacement continu, le long de l'axe du fil, des particules situées sur cet axe met en mouvement les cellules voisines en

Fig. 24.

produisant une série de tourbillons moléculaires qui ont la forme d'anneaux concentriques à l'axe.

La couche de cellules qui entoure celle que nous venons de

considérer est séparée de cette dernière par une série de petits courants d'électricité de même sens que le courant central. Il faut, pour qu'il en soit ainsi, que les cellules de la deuxième couche tournent dans le même sens que celles de la première, mais *plus vite*. Si elles tournaient aussi vite, les particules intermédiaires resteraient sur place. Si elles tournaient moins vite, les particules intermédiaires seraient chassées en sens contraire du courant central.

De proche en proche le mouvement se propage ainsi avec des vitesses de rotation de plus en plus grandes jusqu'à la surface du fil ; il se propage ensuite au-delà, dans le diélectrique, par un mécanisme semblable, avec cette différence pourtant que les particules d'électricité ne pouvant plus avoir de déplacement continu se contentent de tourner sur elles-mêmes en transmettant de proche en proche le mouvement des tourbillons.

Le courant électrique engendre donc tout autour de lui un champ magnétique. La direction des forces du champ sera conforme à celle qu'indique l'expérience, à la condition de faire une hypothèse sur le sens de la force magnétique engendrée par un tourbillon donné.

L'expérience montre, en effet, que la force magnétique et le courant sont dirigés l'un par rapport à l'autre comme la figure l'indique.

Or, la direction supposée au courant a pour effet d'entraîner les cellules dans le sens marqué par les petites flèches. Il faut en conclure qu'un tourbillon moléculaire fait *vis à droite* par rapport à la direction de la force magnétique qu'il engendre.

Courants d'induction. — Les tourbillons moléculaires ainsi excités dans l'espace viennent-ils à rencontrer un second fil conducteur parallèle au premier, aussitôt ils agissent sur les cellules superficielles de ce dernier et leur communiquent, par l'intermédiaire des particules d'électricité, une rotation de même sens que celle dont ils sont animés.

Or, les particules d'électricité sont libres de se mouvoir à l'intérieur d'un conducteur. La rotation des cellules leur communique donc un déplacement continu qui se trouve dirigé — en vertu du mécanisme même qui le produit — en sens contraire du courant dans le premier fil.

Ainsi se trouve expliqué le courant induit inverse qui prend naissance, conformément à l'expérience, dans le second fil.

Ce courant ne dure d'ailleurs qu'un instant, car le mouvement tourbillonnaire continuant à se propager, la rotation des cellules suivantes, agissant en sens contraire sur les particules considérées, arrête bientôt leur mouvement de translation ; ces particules n'en continuent pas moins à tourner sur elles-mêmes en transmettant les rotations.

Vitesse de propagation. — Imaginons maintenant que les cellules soient douées d'élasticité et que, par suite, elles n'entrent en rotation qu'après avoir subi une certaine déformation.

Le mouvement tourbillonnaire ne se propagera pas instantanément, mais avec une vitesse finie, fonction de l'élasticité.

Plus cette élasticité sera grande, c'est-à-dire plus sera petite la déformation nécessaire au développement d'une force élastique déterminée, plus considérable sera la vitesse de propagation.

Le raisonnement que nous avons précédemment donné pour établir la formule de la célérité

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}},$$

est d'ailleurs indépendant, comme nous l'avons fait remarquer, de toute hypothèse relative à la constitution du milieu propagateur, pourvu que ce milieu soit doué d'élasticité et de masse.

La formule de Newton est donc directement applicable à la propagation par tourbillons moléculaires.

Nombre v de Maxwell. — Considérons deux charges égales et de signes contraires placées à l'unité de distance dans un diélectrique déterminé. Soit m la valeur commune de ces charges exprimée dans le système électrostatique d'unités.

Les particules d'électricité comprises entre les deux charges subissent, comme nous l'avons expliqué, un déplacement qui développe dans le milieu considéré une certaine force élastique proportionnelle à l'élasticité du milieu, et d'où dérive l'attraction réciproque des deux charges.

Or, dans le système électrostatique, cette attraction est numériquement égale au carré de m (la distance des deux charges étant supposée égale à l'unité). *Le nombre* m *est donc proportionnel à la racine carrée de l'élasticité.*

Considérons maintenant deux courants parallèles dans chacun desquels une quantité électrostatique m d'électricité s'écoule pendant l'unité de temps. Nous allons chercher la valeur électromagnétique m' de cette quantité.

Dans le système électromagnétique, la force qui prend naissance entre les deux courants (supposés à l'unité de distance l'un de l'autre) est proportionnelle à m'^2. Or, dans notre théorie, cette force proportionnelle à m'^2 résulte des pressions latérales dues à la rotation des cellules ; ces pressions latérales sont évidemment proportionnelles à la masse des cellules et au carré de leur vitesse de rotation (celle-ci constante pour un courant d'intensité donnée).

Si donc on vient à changer la nature du diélectrique, l'intensité des courants étant supposée invariable, la force répulsive ou attractive qui s'exerce entre les deux courants (suivant leur sens relatif) variera proportionnellement à la masse des cellules c'est-à-dire à la densité du milieu propagateur.

Il en résulte que m' est proportionnel à la racine carrée de cette densité.

Rapprochant l'un de l'autre m et m' on voit que le rapport $\frac{m}{m'}$ est proportionnel à $\sqrt{\frac{e}{d}}$.

On peut montrer que le coefficient de proportionnalité est égal à l'unité.

Soient alors u et u' les unités électrostatique et électromagnétique de quantité d'électricité. Le rapport $\frac{u'}{u}$ est le nombre ν de Maxwell et l'on a

$$\nu = \frac{u'}{u} = \frac{m}{m'} = \sqrt{\frac{e}{d}}.$$

Mais la quantité $\sqrt{\frac{e}{d}}$ représente la vitesse de propagation V des phénomènes électromagnétiques.

Il en résulte que

$$\nu = \mathrm{V},$$

c'est-à-dire que le nombre ν de Maxwell est numériquement égal à la vitesse de propagation des phénomènes électromagnétiques.

Nous avons vu comment cette égalité a été confirmée par l'expérience.

Théorie électromagnétique de la lumière. — Considérons les particules d'électricité répandues dans le vide ou dans un diélectrique donné. Ces particules ne sont susceptibles, dans la théorie que nous venons d'exposer, que de déplacements très petits si le milieu n'est pas conducteur. Grâce à l'élasticité du milieu, elles reviennent à leur position initiale dès que la cause qui a provoqué le déplacement a cessé d'agir.

Ces particules sont susceptibles également de déplacements alternatifs plus ou moins rapides qui communiquent aux cellules voisines un mouvement rotatoire alternatif de même période.

D'après Maxwell, ce sont ces vibrations de l'électricité, lorsqu'elles sont très rapides, qui constituent la lumière.

Lorsqu'elles sont mille fois moins rapides environ elles donnent naissance aux phénomènes découverts par Hertz : propagation de l'onde électromagnétique. Les deux ordres de phénomènes dérivant du même mécanisme, on conçoit que la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique soit égale à celle de la lumière.

Dispersion dans le vide. — Si l'on admet que l'élasticité développée par les vibrations des particules d'électricité est fonction de la période et qu'elle est d'autant plus grande que la période est plus petite, ce qui paraît naturel, il faudra en conclure que la vitesse de propagation est fonction de la période et que la lumière violette se propage plus vite que la rouge.

Interférences. — Les phénomènes d'interférences s'expliquent tout aussi bien dans cette théorie que dans celle de Fresnel. Qu'une cellule se trouve sollicitée à la fois par deux mouvements rotatoires alternatifs décalés l'un par rapport à l'autre d'une demi-période et elle restera au repos. Nous ne pousserons pas plus loin cette analyse de la théorie de Maxwell. Il nous a suffi d'en dire ce qu'il fallait à propos de la célérité des ébranlements de l'éther.

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

L'Enseignement Mathématique

REVUE INTERNATIONALE

PARAISSANT TOUS LES DEUX MOIS

Par fascicules in-8° raisin de 80 pages.

DIRECTEURS :

C.-A. LAISANT
Docteur ès-sciences
Examinateur d'admission
à l'École polytechnique de Paris

H. FEHR
Docteur ès-sciences
Privat-Docent à l'Université de Genève
Professeur
au Collège et à l'École professionnelle

COMITÉ DE PATRONAGE :

MM. **P. APPELL** (Paris); — **N. BOUGAIEV** (Moscou); — **Moritz CANTOR** (Heidelberg); — **L. CREMONA** (Rome); — **E. CZUBER** (Vienne); — **Z.-G DE GALDEANO** (Saragosse); — **A.-G. GREENHILL** (Woolwich); — **F. KLEIN** (Göttingen); — **V. LIGUINE** (Varsovie); — **P. MANSION** (Gand); — **MITTAG-LEFFLER** (Stockholm); — **G. OLTRAMARE** (Genève); — **Julius PETERSEN** (Copenhague); — **E. PICARD** (Paris); — **H. POINCARÉ** (Paris); — **P.-H. SCHOUTE** (Groningue); — **C. STEPHANOS** (Athènes); — **F. Gomes TEXEIRA** (Porto); — **A. VASSILIEF** (Kasan); — **ZIWET** (Ann-Arbor, Michigan, U. S. A).

PRIX DE L'ABONNEMENT ANNUEL :

France et Colonies, Suisse, **12** fr. ; Union postale, **15** fr.
Le numéro, **3** fr.

Tous ceux qui s'intéressent à la Science mathématique et à ses progrès savent quelle importance il faut attribuer à l'enseignement. Or, les mathématiciens des divers pays vivent à cet égard dans une ignorance presque complète de ce qui se fait au delà des frontières. Il y aurait cependant un intérêt considérable à connaître l'organisation de l'enseignement, les programmes, les méthodes pédagogiques, les tentatives de perfectionnements, les modifications qui surviennent, etc. De là est sortie l'idée de l'*Enseignement mathématique,* qui, dès son apparition, a groupé des adhésions illustres, qui nous sont bien précieuses. Cet organe international s'attache surtout à l'enseignement secondaire ou moyen, mais sans négliger aucune des autres branches. Il a un caractère franchement international, bien que publié en langue française.

L'*Enseignement mathématique* paraît tous les deux mois par fascicules de 80 pages in-8 raisin.

COURS

DE

PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

De M. H. POINCARÉ

MEMBRE DE L'INSTITUT

1° **Théorie mathématique de la lumière.** — I. Leçons professées pendant le premier semestre 1887-1888, 1 volume in-8°, 420 pages. . . **16 fr. 50**

2° **Électricité et Optique.** — I. Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière. Leçons professées pendant le second semestre 1888-89, 1890. 1 vol. in-8° de 340 pages avec fig., 2e édit. *(Sous presse).*

II. Les théories de Helmoltz et les expériences de Hertz. Leçons professées pendant le second semestre 1889-90. 1891. 1 vol. in-8° de XII-264 pages, 2e édit. *(Sous presse).*

3° **Thermodynamique.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1888-89. 1892. 1 vol. in-8° de XX-432 pages. . . . . **16 fr.** »

4° **Leçons sur la théorie de l'Élasticité,** professées pendant le premier semestre 1890-91. 1 vol. in-8° de 210 pages. . . . . **6 fr. 50**

5° **Théorie mathématique de la lumière.** — II. Nouvelles études sur la diffraction. Théorie de la dispersion de Helmoltz. Leçons professées pendant le premier semestre 1887-88. 1892. 1 vol. in-8° raisin de VI-312 pages, avec figures. . . . . **10 fr.** »

6° **Théorie des tourbillons.** — Leçons professées pendant le deuxième semestre 1891-92. 1893. 1 vol. in-8° raisin de VI-212 p., avec fig. . **6 fr.** »

7° **Les oscillations électriques.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1892-93, rédigées par Ch. Maurain, ancien élève de l'École normale supérieure, agrégé de l'Université. 1894. 1 vol. in-8° raisin de 344 pages, avec figures. . . . . **12 fr.** »

8° **Capillarité.** — Leçons professées pendant le deuxième semestre 1888-89, rédigées par J. Blondin, agrégé de l'Université. 1895. 1 vol. in-8° raisin de 196 pages, avec figures. . . . . **5 fr.** »

9° **Théorie analytique de la propagation de la chaleur.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1893-94, rédigées par MM Rouyer et Baire, élèves de l'École normale supérieure. 1895. 1 vol. in-8° raisin de 320 pages, avec figures. . . . . **10 fr.** »

10° **Calcul des probabilités.** — Leçons professées pendant le deuxième semestre 1893-94, rédigées par A. Quiquet, ancien élève de l'École normale supérieure. 1896. 1 vol. in-8° raisin de 280 pages, avec figures. . **9 fr.** »

11° **Théorie du potentiel newtonien.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1894-95, rédigées par Ed. Leroy et Georges Vincent, de l'École normale supérieure. 1899 1 vol. in-8° raisin de 370 p., avec fig., **14 fr.** »

SCIENCES PHYSIQUES ET MATHÉMATIQUES

CINÉMATIQUE ET MÉCANISMES

POTENTIEL ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

COURS PROFESSÉ A LA SORBONNE

Par H. POINCARÉ

MEMBRE DE L'INSTITUT

Rédigé par A. Guillet.

1 vol. in-8° raisin de 392 pages, avec 279 figures. . . . . **15 fr.**

UNITÉS ÉLECTRIQUES

ABSOLUES

LEÇONS PROFESSÉES A LA SORBONNE EN 1884-1885

Par G. LIPPMANN

MEMBRE DE L'INSTITUT

Rédigées par A. Berget, docteur ès sciences.

1 vol. in-8° raisin de 230 pages, avec figures. Prix . **10 fr.** »

ÉLÉMENTS
D'ANALYSE MATHÉMATIQUE

A L'USAGE DES INGÉNIEURS ET DES PHYSICIENS

COURS PROFESSÉ A L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES

Par P. APPELL

MEMBRE DE L'INSTITUT

1 vol. in-8° raisin de 720 pages, avec figures, cartonné à l'anglaise.
Prix : **24** francs.

BIBLIOTHÈQUE DE LA REVUE GÉNÉRALE DES SCIENCES

Vient de Paraître

HISTOIRE

DES

MATHÉMATIQUES

PAR

Jacques BOYER

1 vol. in-8° carré, de 226 pages, avec 30 gravures, cartonné à l'anglaise. . . . **5** fr.

BIBLIOTHÈQUE DE LA REVUE GÉNÉRALE DES SCIENCES

Vient de Paraître

MESURE

DES

TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

PAR

H. LE CHATELIER

INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES, PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE

ET

O. BOUDOUARD

PRÉPARATEUR AU COLLÈGE DE FRANCE

1 volume in-8° carré, cartonné à l'anglaise. . . **5** fr.

BIBLIOTHÈQUE DE LA REVUE GÉNÉRALE DES SCIENCES

Vient de Paraître

ÉQUILIBRE

DES

SYSTÈMES CHIMIQUES

PAR

J. WILLARD-GIBBS

PROFESSEUR AU COLLÈGE YALE, A NEWHAVEN

Traduit par HENRY LE CHATELIER

INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES, PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE

1 volume in-8° carré de 212 pages,
avec figures, cartonné à l'anglaise . . . . . **5** fr.

BIBLIOTHÈQUE TECHNOLOGIQUE

Vient de Paraître

LES SUCRES

ET LEURS PRINCIPAUX DÉRIVÉS

PAR

L. MAQUENNE

PROFESSEUR AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE

1 volume in-8° carré de 1032 pages,
cartonné à l'anglaise . . . . . **16** fr.

BEDELL (F.) et **CREHORE (A. C.)**, professeurs à l'Université de Cornell. — **Étude analytique et graphique des courants alternatifs,** ouvrage traduit de la deuxième édition anglaise par J. Berthon, ingénieur des arts et manufactures. 1 vol. in-8° raisin de 272 pages, avec figures. . . **10 fr.** »

BOUASSE (Henri), ancien élève de l'École normale supérieure, maître de conférences à la Faculté des sciences de Toulouse. — **Introduction à l'Étude des Théories de la mécanique.** 1895. 1 vol. in-8° raisin de VIII-304 pages, avec figures. . . . . **6 fr.** »

FOUSSEREAU (G.), maître de conférences à la Faculté des sciences de Paris. — **Polarisation rotatoire.** Réflexion et Réfraction vitreuses. Réflexion métallique. Leçons faites à la Sorbonne en 1891-92, rédigées par J. Lemoine, agrégé de l'Université. 1893. 1 volume in-8° raisin de VIII-344 pages, avec 140 figures. . . . . **12 fr.** »

GREENHILL (Alfred-George), professeur de mathématiques au Collège de Wolwich. — **Les fonctions elliptiques et leurs applications.** Ouvrage traduit de l'anglais par J. Griess, professeur de mathématiques au lycée d'Alger. 1895. 1 vol. in-8° raisin de 572 pages, avec figures. . . . . **18 fr.** »

JAMET (V.), docteur ès sciences mathématiques, professeur au lycée de Marseille. — **Traité de mécanique,** à l'usage des candidats à l'Ecole polytechnique. 1893. 1 vol in-8° raisin de 252 pages, avec figures. . . . . **5 fr.** »

LAISANT (G.-A.). — **La Mathématique.** Philosophie. Enseignement. 1898. 1 vol. in-8° carré de 292 pages, cartonné à l'anglaise (*Bibliothèque de la Revue générale des Sciences.*). . . . . **5 fr.** »

LION (G.). — **Traité élémentaire de cristallographie géométrique,** à l'usage des candidats à la licence et des chimistes. 1891. 1 vol. in-8° de 152 pages, avec 134 figures. . . . . **5 fr.** »

OSSIAN-BONNET, membre de l'Institut. — **Astronomie sphérique.** Notes sur le cours professé pendant l'année 1887, rédigées par MM. Blondin et Guillet. Premier fascicule. 1889. 1 vol. in-8° de 116 pages. . . . **5 fr.** »

PALAZ (Adrien), professeur à l'Université de Lausanne. — **Traité de Photométrie industrielle,** spécialement appliquée à l'éclairage électrique. 1892. 1 vol. in-8° raisin de 300 pages, avec 92 figures. . . . . **9 fr.** »

PELLAT (H.), professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Paris. — **Leçons sur l'Électricité** (électrostatique, pile, électricité atmosphérique), faites à la Sorbonne 1888-89, rédigées par J. Blondin, agrégé de l'Université. 1890. 1 vol. in-8° raisin de 416 pages, avec 142 figures. . . . . **12 fr.** »

— **Polarisation et Optique cristalline.** Leçons professées à la Sorbonne, rédigées par MM. Duperray et Gallotti. 1896. 1 vol. in-8° raisin de 284 pages, avec 141 figures. . . . . **9 fr.** »

— **Thermodynamique.** Leçons professées à la Sorbonne en 1895-96, et rédigées par MM. Duperray, agrégé de l'Université, professeur au lycée de Nantes, et Goisot, ancien élève de l'École normale supérieure, préparateur à la Sorbonne. 1897. 1 vol. in-8° raisin de 314 pages, avec 50 figures. . **12 fr.** »

PUISEUX (P.), maître de conférences à la Faculté des sciences de Paris. — **Leçons de Cinématique.** Mécanismes. Hydrostatique. Hydrodynamique; Cours professé à la Sorbonne, rédigé par MM. P. Bourguignon et H. Le Barbier. 1890. 1 vol. in-8° de VIII-340 pages, avec figures. . . . . **9 fr.** »

SOUCHON (Abel), membre adjoint du Bureau des longitudes, attaché à la rédaction de la Connaissance des Temps. — **Traité d'astronomie théorique,** contenant l'exposition du calcul des perturbations planétaires et lunaires, et son application à l'explication et à la forme des tables astronomiques, avec une introduction historique et de nombreux exemples numériques. Ouvrage dédié aux astronomes, aux marins et aux élèves de l'Enseignement supérieur. 1891. 1 vol. grand in-8° de VIII-504 pages. . . . . **16 fr.** »

VOYER (J.), capitaine du génie. — **Théorie élémentaire des courants alternatifs.** 1894. in-8° écu de 92 pages, avec 50 figures. . . . **2 fr.** »

WOLF (G.), membre de l'Institut, astronome de l'Observatoire de Paris. — **— Astronomie et Géodésie.** Cours professé à la Sorbonne, rédigé par MM. H. Le Barbier et P. Bourguignon, licenciés ès sciences. 1891. 1 vol. in-8° VII-416 pages, avec figures dans le texte. . . . . 10 fr. »

ZENGER (Ch.-V.), professeur à l'École polytechnique de Prague. — **Le Système du monde électro-dynamique.** 1893. Brochure in-8° raisin de 64 pages, avec 17 figures. . . . . 2 fr. »

CHIMIE

BARRAL (E.), professeur agrégé à la Faculté de médecine de Lyon. — **Résumé et tableaux d'analyse qualitative minérale.** 1898. 1 vol. in-8° cart. à l'anglaise. . . . . 2 fr. »

BÉHAL (Aug.), professeur agrégé à l'École de Pharmacie. — **Étude théorique sur les composés azoïques** et leurs emplois industriels. 1889. 1 vol. in-8° raisin de 174 pages. . . . . 6 fr. »

EFFRONT (J.), directeur de l'Institut des fermentations. — **Les Enzymes** et leurs applications. 1899. 1 vol. in-8° carré, de 370 pages, cart. à l'anglaise. . . . . 9 fr. »

FRIEDEL (Ch.), membre de l'Institut. — **Conférences faites au Laboratoire de chimie organique** de la Faculté des Sciences. 1888-94. 4 vol. in-8° raisin. . . . . 26 fr. »

GARROS (F.). — Étude sur les acides gummiques ; nouveau sucre en C^5 « Prunose ». 1894. Brochure in-8 raisin de 92 pages. . . 3 fr. »

GUÉRIN (G.), professeur agrégé à la Faculté de médecine de Nancy. — **Traité pratique d'analyse chimique** et de recherches toxicologiques. 1893. 1 vol. in-8° raisin de 500 pages, avec 75 fig. et 5 planches en chromolithographie. . . . . 15 fr. »

HANTZSCH. — Précis de Stéréochimie, traduct. française par MM. Guye et Gautier. 1896. 1 vol. in-8° raisin de 224 pages, avec figures. . . 8 fr. »

MESLANS (M.). — Sur l'éthérification de l'acide fluorhydrique. 1893. in-8° raisin de 44 pages. . . . . 4 fr. »

MEYER (Lothar). — Les théories modernes de la chimie et leur application à la mécanique chimique. Ouvrage traduit de l'allemand par MM. A. Bloch et Meunier. 1887-89. 2 vol. in-8° raisin d'ensemble 786 pages. 25 fr. »

MOUREU (Ch.), pharmacien en chef des Asiles de la Seine — **Étude théorique sur les composés pyridiques et hydropyridiques.** 1894. 1 vol. in-8° raisin de 148 pages. . . . . 6 fr. »

OSTWALD (W.), professeur à l'Université de Leipzig.— **Abrégé de chimie générale.** Ouvrage trad. de l'allemand par M. G. Charpy. 1893. 1 vol in-8° raisin de 456 pages. . . . . 12 fr. »

REYCHLER (A.). — Les théories physico-chimiques. 1897. 1 vol. in-8° raisin de 282 pages, avec 50 figures. . . . . 6 fr. »

THOMAS-MAMERT (R.). — Sur l'application de la Stéréochimie aux réactions internes entre les radicaux éloignés d'une même molécule. 1895. Brochure in-8° raisin. . . . . 2 fr. »

VAN t'HOFF (J.-H.) — Stéréochimie. 1892. 1 vol. in-8° raisin de 176 pages. . . . . 6 fr. 50

NIETZKI. — Chimie des matières colorantes *(Sous presse).*

H. ARMAGNAT
Chef du bureau des mesures électriques des ateliers Carpentier

INSTRUMENTS ET MÉTHODES
DE
MESURES ÉLECTRIQUES INDUSTRIELLES

1 vol. in-8° carré de 588 pages, avec 175 figures, cartonné à l'anglaise
Prix : **12** francs.

G. ARTH
Professeur de Chimie industrielle à la Faculté des Sciences de Nancy

RECUEIL DE PROCÉDÉS DE DOSAGE
POUR L'ANALYSE
des Combustibles, des Minerais de fer, des Fontes, des Aciers et des Fers

1 vol. in-8° carré de 313 pages, avec 61 figures et 1 planche hors texte, cartonné à l'anglaise : **8** fr.

Émile FLEURENT
Docteur ès siences, professeur de Chimie industrielle au Conservatoire national des Arts et Métiers

MANUEL D'ANALYSE CHIMIQUE
APPLIQUÉE A L'EXAMEN
DES PRODUITS INDUSTRIELS ET COMMERCIAUX

1 volume in-8° carré de 582 pages avec 101 figures. — Prix : **12** francs.

Lucien LÉVY
Docteur ès sciences, ingénieur agronome, professeur de distillerie à l'Ecole nationale des industries agricoles

LA PRATIQUE DU MALTAGE

1 volume in-8° carré de 250 pages, avec 53 figures, cartonné à l'anglaise.
Prix : **7** francs.

E. SOREL
Ex-ingénieur des Manufactures de l'État

DISTILLATION & RECTIFICATION INDUSTRIELLES

1 volume in-8° carré de 408 pages, avec 46 figures, cartonné à l'anglaise.
Prix : **12** francs.

Jean EFFRONT
Professeur à l'Université nouvelle de l'Institut des Fermentations de Bruxelles.

LES ENZYMES ET LEURS APPLICATIONS

1 volume in-8° carré de 372 pages, cartonné à l'anglaise. — Prix : **9** francs.

Sous presse :

NIETZKI. — **Chimie des matières colorantes.**
LÉVY. — **Microbiologie de la distillerie. — Ferments. — Microbes.**
— **Préparation des moûts.**
EFFRONT. — **Les matières albuminoïdes et leurs enzymes.**
PÉLISSIER. — **Les automobiles.**
VIVARÈS. — **L'électricité.**
CHEVRIER. — **La pratique industrielle des courants alternatifs.**
GRANGER. — **La céramique. — Chimie et technologie.**
LABBÉ. — **Les parfums.**

CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT.

G.E.STECHERT
NEW YORK

3 0112 106067876